

# ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL MODELO FÍSICO DE UN INVERNADERO BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO

## ANALYSIS AND SIMULATION OF A GREENHOUSE PHYSICAL MODEL UNDER WEATHER CONDITIONS OF THE CENTRAL REGION OF MÉXICO

Rodrigo Castañeda-Miranda, Eusebio Jr. Ventura-Ramos, Rebeca del R. Peniche-Vera y Gilberto Herrera-Ruiz

Facultad de Ingeniería. DEPEFI. Laboratorio de Biotrónica. Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas s/n. 76010. Querétaro, Querétaro. (rcast@uaq.mx)

### RESUMEN

El uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha crecido en México rápidamente en los últimos años. Lo más importante para el éxito de estos agronegocios es incrementar la eficiencia de la producción, lograr mayor calidad y alta productividad, lo cual está relacionado con las condiciones climáticas específicas de cada región. En este estudio se presenta el análisis y simulación de un modelo matemático del clima en un invernadero. El modelo está formulado con base en los principales procesos de transferencia de masa y energía, y simula las temperaturas del aire, suelo, cubierta, cultivo, y humedad relativa del invernadero. La simulación dinámica del modelo matemático se hizo con la herramienta SIMULINK del software MATLAB. Los resultados de la simulación se calibraron y validaron con los datos medidos en un invernadero experimental de 1000 m<sup>2</sup> desarrollado en la Universidad Autónoma de Querétaro. Los resultados de la validación fueron ecuaciones de predicción: para la temperatura de la cubierta ( $R^2=0.855$ ), temperatura del aire interno ( $R^2=0.964$ ), temperatura del cultivo ( $R^2=0.835$ ), temperatura del suelo ( $R^2=0.714$ ) y humedad relativa ( $R^2=0.960$ ). La magnitud de los coeficientes indica que el modelo puede usarse para la predicción del clima en el invernadero con un buen nivel de confianza y es una herramienta de apoyo para el análisis de las condiciones necesarias para la producción de hortalizas en invernaderos bajo las condiciones climáticas de la región central de México.

**Palabras clave:** Balance de energía, invernaderos, modelo climático, simulación dinámica.

### INTRODUCCIÓN

La producción de cultivos en invernadero es una técnica moderna usada en la producción agrícola; su ventaja sobre el método tradicional a cielo abierto es que se establece una barrera entre el medio ambiente externo y el cultivo. Esta barrera crea un microclima que permite protegerlo del viento, granizo, heladas, plagas, enfermedades,

Recibido: Noviembre, 2006. Aprobado: Marzo, 2007.  
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 41: 317-335. 2007.

### ABSTRACT

The use of greenhouses for vegetable production has expanded rapidly in recent years in México. The most important aspect for the success of these agro-businesses is the improvement of production efficiency, higher quality and productivity, which are related to specific climatic conditions of each region. The present study introduces the analysis and simulation of a mathematical model of greenhouse climate. The model is formulated on basic principles of mass and energy transfer processes, and simulates the greenhouse air, soil, roof and crop temperatures, as well as relative humidity. The dynamic simulation of the mathematical model was made using the SIMULINK tool of MATLAB software. The simulation results were calibrated and validated with the measured data collected in a 1000 m<sup>2</sup> experimental greenhouse developed at the University of Querétaro. The results from the validation were prediction equations for the roof temperature ( $R^2=0.855$ ), inner air temperature ( $R^2=0.964$ ), crop temperature ( $R^2=0.835$ ), soil temperature ( $R^2=0.714$ ) and relative humidity ( $R^2=0.960$ ). The magnitude of the coefficients indicates that the model can be used to predict the greenhouse climate with a high level of confidence, and it is a tool for supporting the analysis of the necessary conditions for greenhouse vegetable production under climatic conditions of the Central Region of México.

**Key words:** Energy balance, greenhouses, climatic model, dynamic simulation.

### INTRODUCTION

Greenhouse crop production is a modern technique used in agricultural production; its advantage over the traditional open sky method is that a barrier is established between the external environment and the crop. This barrier creates a microclimate that protects the crop from wind, hail, pests, diseases, weeds and animals. This protection also allows the grower to control temperature, the amount of light, and to have an effective chemical and biological control to protect the crop. This gives greenhouse production higher yields than in traditional systems. The introduction of greenhouses with manually operated ventilation

hierbas y animales. Además esta protección permite controlar la temperatura, la cantidad de luz y hacer un control químico y biológico efectivo para proteger el cultivo. Así, la producción en invernadero tiene rendimientos más altos que los tradicionales. La introducción de invernaderos con sistemas de ventilación de operación manual y sensores simples en México, ha logrado aumentos en el rendimiento del cultivo de tomate de hasta  $13 \text{ kg m}^{-2}$  (Rodríguez, 1996)<sup>[1]</sup>. Una mejor administración del cultivo (fertilización, riego, poda, etc.) y el uso de sistemas de control automático de clima y riego, permiten obtener rendimientos hasta de  $40 \text{ kg m}^{-2}$ ; sin embargo, algunos productores holandeses obtienen hasta  $78 \text{ kg m}^{-2}$  (LEIDLO, 1996). México está rezagado en la productividad por metro cuadrado de invernadero, principalmente por la diferencia tecnológica y el conocimiento desarrollado en otros países en el área de ingeniería de invernaderos (diseño, equipamiento, etc.) adecuada a sus características. Ésto evidencia la necesidad de desarrollar métodos propios, conocimientos y habilidades técnicas en el área de invernaderos. Las investigaciones enfocadas al desarrollo de modelos climáticos reflejan conocimiento científico de forma cuantitativa, y pueden usarse para diseñar herramientas de ingeniería para invernaderos.

El desarrollo de modelos del clima permite predecir el comportamiento de los diferentes componentes que integran el agrosistema invernadero y sus interacciones. Éstos permiten controlar mejor las condiciones de crecimiento dentro del invernadero, las cuales están determinadas por factores como radiación, temperatura, humedad, concentración de  $\text{CO}_2$  y velocidad del viento (Challa, 1990), y donde todos guardan una estrecha relación con las condiciones climáticas específicas de cada región y son afectados por la cubierta del invernadero. Además, este tipo de herramientas se utiliza en el diseño de invernaderos, y para el análisis y diseño de nuevos algoritmos y métodos de control (Bakker *et al.*, 1995). Hay una gran necesidad de modelos de invernaderos, especialmente en países donde este tipo de tecnología de producción es relativamente nueva.

Los modelos del clima de caja negra están basados en el análisis de los datos de entrada y salida del proceso, por ejemplo, los modelos de Udink Ten Cate (1983) y Cunba *et al.* (1992). Sin embargo, este tipo de modelos, por su naturaleza, son de un bajo orden y no incorporan ningún conocimiento directo del sistema, por lo que no son adecuados para usarse en otras configuraciones o tipos de invernadero. Otros modelos se basan en las leyes físicas, donde se deben

systems and simple sensors in México, has permitted increases in the yield of the tomato crop of as much as  $13 \text{ kg m}^{-2}$  (Rodríguez, 1996)<sup>[1]</sup>. A better administration of the crop (fertilization, irrigation, pruning, etc.) and the use of automatic control systems of climate and irrigation, make it possible to obtain yields of up to  $40 \text{ kg m}^{-2}$ ; however, some Dutch producers achieve as much as  $78 \text{ kg m}^{-2}$  (LEIDLO, 1996). México is behind in productivity per square meter in the greenhouse, mainly because of the difference of technology and knowledge that has been developed in other countries in the area of greenhouse engineering (design, equipment, etc.) that is suited to its characteristics. This underlines the need for developing our own methods, knowledge, and technical abilities in the area of greenhouses. The investigations focused on the development of climatic models reflect scientific knowledge in a quantitative way, and can be used to design engineering tools for greenhouses.

The development of climatic models allows the prediction of the performance of the different components that integrate the greenhouse agrosystem and its interactions. They make it possible to have better control of the growth conditions inside the greenhouse, which are determined by factors such as radiation, temperature, humidity,  $\text{CO}_2$  concentration and wind velocity (Challa, 1990), and where all are closely related to the specific climatic conditions of each region and are affected by the roof of the greenhouse. In addition, this type of tool is used in greenhouse design, and for the analysis and design of new algorithms and control methods (Bakker *et al.*, 1995). There is a great need for greenhouse models, especially in countries where this type of production technology is relatively new.

Black box models are based on the analysis of the input and output data of the process, for example, the models of Udink Ten Cate (1983) and Cunba *et al.* (1992). However, these types of models are by nature of a low order and do not incorporate any direct knowledge of the system, thus they are not adequate to be used in other configurations or types of greenhouses. Other models are based on physical laws, where the processes responsible for the transfer of energy and mass must be examined. This type of model describes in detail the climate in a greenhouse with respect to the external climatic conditions, the physical properties of the greenhouse and its equipment, and consequently, are of Bot high order (1983). The main reason for the slow development of this type of model is the complexity of the climate inside a greenhouse (Udink Ten Cate, 1985a).

<sup>1</sup> Rodríguez, E. 1996. Efecto de la poda y densidad de población en el rendimiento y calidad de fruto de jitomate. Tesis doctoral. Universidad Autónoma Chapingo, México. 79 p.

examinar los procesos responsables de la transferencia de energía y masa. Este tipo de modelos describe detalladamente el clima en un invernadero en relación con las condiciones climáticas externas, las propiedades físicas del invernadero y su equipamiento, y, por consiguiente, son de alto orden Bot (1983). La razón principal del lento desarrollo de este tipo de modelos es la complejidad del clima en un invernadero (Udink Ten Cate, 1985a).

Con la finalidad de obtener una herramienta para el análisis de las condiciones necesarias para la producción de hortalizas en las condiciones climáticas de la región Centro de México se desarrolló, calibró y validó un modelo matemático para describir el comportamiento de las variables climáticas más importantes del ambiente interno en un invernadero. El modelo simula la dinámica del clima de un invernadero con cultivo de jitomate, y está basado en los trabajos de Bot (1983), Udink Ten Cate (1985b), Takakura (1989), Tchamitchian *et al.* (1992), Salim (1993), Van-Henten (1994), Jones *et al.* (1995), Tap (2000) y Tavares *et al.* (2001). Se consideran sólo los flujos verticales, suponiendo que el invernadero no tiene variabilidad horizontal, y se simula a las temperaturas del aire, suelo, cubierta, cultivo y humedad relativa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las simulaciones se llevaron a cabo de abril a julio del año 2002 en un invernadero experimental diseñado y construido en la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) (Figura 1). Es un invernadero a dos aguas, cubierto de plástico y con el piso forrado con una lona blanca. Tiene 37.1 m de longitud en dirección nortesur y cuatro naves, cada una de 6.75 m (27 m ancho). Tiene una altura máxima de 4.5 m y 3 m hasta el nivel de las canaletas, con ventanas laterales de cortinas enrollables en las cuatro paredes, y ventanas cenitales de 62 m<sup>2</sup> en cada nave. Se manejó una densidad de 2 plantas m<sup>-2</sup> de jitomate Gabriela en macetas de plástico blanco de 15 kg con tezontle rojo como sustrato con partículas menores a 8 mm. Se equipó con el sistema de control de clima y riego TUNA® SCCII v4.0 desarrollado en la UAQ. Con base en el control del equipamiento disponible en el invernadero y la retroacción de las señales provenientes de los distintos sensores usados para registrar las variables climáticas, este sistema integra técnicas de control inteligente para tratar de mantener las condiciones climáticas lo más cercano posible a las consignas programadas por el usuario. Además, este sistema genera una base de datos históricos de las variables climáticas (externas e internas) y estado del equipamiento del invernadero.

Para registrar las variables climáticas dentro del invernadero, se instalaron sensores (Global Water Instrumentation Inc.), un par de DTR (Detectores de Temperatura Resistivos) para medir la temperatura (°C) y un par de sensores capacitivos para medir la humedad relativa (%), ubicados a una altura de 2.20 m al centro

With the purpose of obtaining a tool for the analysis of the conditions necessary for the production of vegetables under climatic conditions of the Central region of México, a mathematical model was developed, calibrated and validated, for describing the performance of the most important climatic variables of the inner environment in a greenhouse. The model simulates the dynamics of the climate of a greenhouse with a tomato crop, and is based on the works of Bot (1983), Udink Ten Cate (1985b), Takakura (1989), Tchamitchian *et al.* (1992), Salim (1993), Van-Henten (1994), Jones *et al.* (1995), Tap (2000) and Tavares *et al.* (2001). Only the vertical flows are considered, assuming that the greenhouse does not have horizontal variability, and a simulation is made of the temperatures of air, soil, roof, crop and relative humidity.

## MATERIALS AND METHODS

The simulations were carried out between April and July of the year 2002 in an experimental greenhouse designed and constructed at the Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) (Figure 1). It is a greenhouse with a double slanted roof, covered with plastic and the floor is covered with white canvas. It measures 37.1 m in length in a north-south orientation and four naves, each measuring 6.75 m (27 m width). It has a maximum height of 4.5 m and 3 m up to the level of the spouts, with lateral windows of roll-up curtains on the four walls, and zenithal windows of 62 m<sup>2</sup> in each nave. A density of 2 plants m<sup>-2</sup> of Gabriela tomato was used in white plastic pots of 15 kg with red tezontle as substrate with particles smaller than 8 mm. It was equipped with the climate and irrigation control system TUNA® SCCII v.4.0 developed in the UAQ. Based on the control of the equipment available in the greenhouse and the feedback of the signals coming from the different sensors used to register the climatic



**Figura 1. Invernadero experimental diseñado y construido en la Universidad Autónoma de Querétaro.**

**Figure 1. Experimental greenhouse designed and constructed at the Universidad Autónoma de Querétaro.**

de dos naves del invernadero. Para medir las temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) de la cubierta, cultivo y suelo se usaron DTR (Omega Engineering Inc.). Fuera del invernadero se instalaron sensores de temperatura y humedad relativa del mismo tipo que en el interior, un anemómetro para medir la velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ), una veleta para medir la dirección del viento (rad) y un piranómetro (Licor Inc.) para medir la radiación global ( $\text{W m}^{-2}$ ), ubicados a una altura de 5 m y una distancia de 6 m del invernadero. Todos los sensores se conectaron al sistema TUNA<sup>®</sup> SCCII v4.0, el cual se configuró para registrar datos cada 5 min. El estado del equipamiento del invernadero (posición de ventanas, encendido de equipo, etc.) se registró cada minuto en el sistema. Para medir el área foliar se realizó un muestreo semanal de 10 plantas al azar y se usó un sistema de procesamiento de imágenes (Uchida, 2000)<sup>[2]</sup>. Los valores de área foliar obtenidos se interpolaron para obtener datos diarios.

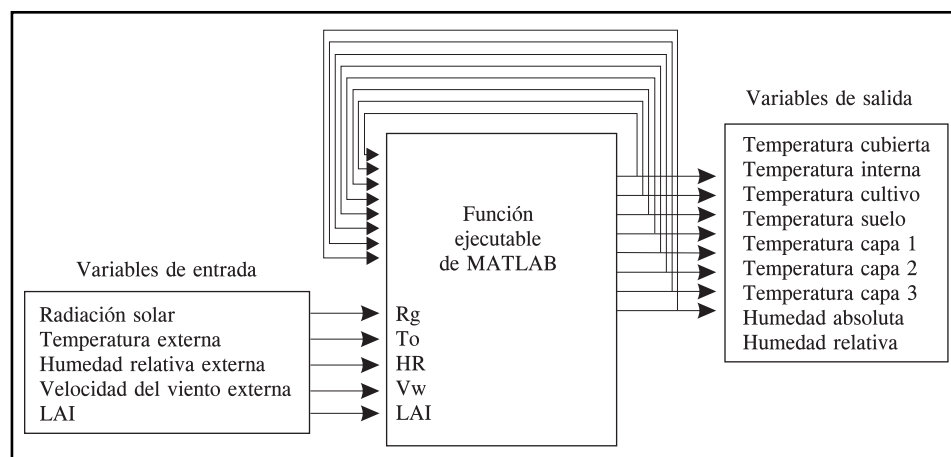
Para la simulación dinámica se formuló un modelo matemático del clima en el invernadero. El conjunto de expresiones matemáticas que lo describen fueron formuladas con base en los principales procesos de transferencia de energía como radiación, conducción, convección y vaporización (Matallana y Montero, 1995). La simulación se hizo con la herramienta SIMULINK del paquete MATLAB de MathWorks, Inc. Las variables de entrada son las condiciones del clima local y el área foliar de la planta. Las condiciones climáticas externas de entrada son la radiación global, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Los parámetros de las ecuaciones se obtuvieron de la literatura. El diagrama de bloques simplificado (Figura 2) representa la función ejecutable de MATLAB que describe el modelo.

Los resultados de las simulación del modelo para las temperaturas del aire, cubierta, suelo, y humedad relativa se compararon con los datos registrados por los sensores dentro del invernadero, de donde se obtuvieron las ecuaciones de regresión lineal y estimadores estadísticos, los cuales se tomaron como indicadores para determinar qué tan aproximadas están las estimaciones de las

variables, this system integrates intelligent control techniques to try to maintain the climatic conditions as close as possible to the assigned conditions programmed by the user. Also, this system generates a base of historic data of the climatic variables (external and internal) and state of the greenhouse equipment.

To record the climatic variables inside the greenhouse, sensors (Global Water Instrumentation Inc.) were installed, a pair of RTDs (Resistive Temperature Detectors) to measure the temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and a pair of capacitive sensors to measure relative humidity (%), located at a height of 2.20 m at the center of two naves of the greenhouse. To measure the temperatures ( $^{\circ}\text{C}$ ) of the roof, crop and soil, RTDs (Omega Engineering Inc.) were used. Outside of the greenhouse, sensors of temperature and relative humidity were installed of the same type as for the interior, an anemometer to measure wind velocity ( $\text{m s}^{-1}$ ), a weather vane to measure wind direction (rad) and a pyranometer (Licor Inc.) to measure global radiation ( $\text{W m}^{-2}$ ), located at a height of 5 m and a distance of 6 m from the greenhouse. All of the sensors were connected to the TUNA<sup>®</sup> SCII v4.0 system, which was configured to register data every 5 min. The state of the greenhouse equipment (position of windows, turning on of equipment, etc.) was recorded every minute in the system. To measure the leaf area, a weekly sampling was carried out of 10 plants at random and an image processing system was used (Uchida, 2000)<sup>[2]</sup>. The values of leaf area obtained were interpolated to obtain daily data.

For the dynamic simulation, a mathematical model was formulated of the climate in the greenhouse. The group of mathematical expressions that describe it were formulated based on the principal energy transfer processes such as radiation, conduction, convection and vaporization (Matallana and Montero, 1995). The simulation was made with the SIMULINK tool of the MATLAB package of MathWorks, Inc. The input variables are the local climatic conditions and the leaf area of the plant. The external climatic conditions of input are global radiation, temperature,



**Figura 2. Diagrama de bloques de la simulación dinámica del modelo.**  
**Figure 2. Diagram of blocks of the dynamic simulation of the model.**

<sup>2</sup> Uchida, H. 2000. Detección de enfermedades en el cultivo de jitomate por medio de procesamiento de imágenes. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Querétaro, México. 68 p.

mediciones. La calibración y validación del modelo se realizó usando datos experimentales independientes. Los parámetros escogidos para la calibración se seleccionaron por inspección del papel de los parámetros del modelo; se seleccionaron los que son inciertos y sensibles y afectan más el comportamiento del sistema. El modelo se calibró usando los datos medidos el 11 y 21 de mayo. Para obtener la bondad del modelo para describir el clima, el modelo se simuló para validar contra los días 11 y 21 de junio y julio.

### Análisis y desarrollo del modelo climático

Aunque para cada parte del invernadero y su contenido (cultivo y equipamiento) puede formularse un balance, en este trabajo sólo se describen los de la cubierta, aire, cultivo, suelo y humedad absoluta. Para cada balance, la cantidad de energía o masa ganada menos la pérdida, es igual a la energía o masa acumulada. Para simplificar los cálculos de los balances de energía, se determinaron los coeficientes de transferencia de calor para los procesos de radiación, conducción y convección (Sissom y Pitts, 1972). El flujo de energía debido a la condensación no se considera en los balances, suponiendo que el sistema de control no permitirá que ocurra. Cada variable y los valores utilizados en este trabajo se encuentran en el Apéndice.

### Coefficientes de transferencia de calor

El flujo de calor por conducción a través de un sólido homogéneo con espesor  $dw$  bajo condiciones de temperatura de estado estacionario es (Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{cond} = \alpha_{cond} (T_1 - T_2)$$

El coeficiente de transferencia de calor por conducción se usa cuando existe transferencia de calor por este mecanismo en un medio restringido, y se define como:

$$\alpha_{cond} = \frac{1}{\sum \frac{\delta}{\lambda_{cond}}} \quad (1)$$

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por radiación debe considerarse el intercambio de energía irradiada entre las superficies de dos cuerpos opacos en un invernadero. Éste puede calcularse con la ecuación (Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{s,12} = \alpha_{s,12} (T_1 - T_2)$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación para dos superficies paralelas es (Kreith, 1995):

$$\alpha_{s,12} = \frac{4\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_2} \sigma \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3 \quad (2)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección se usa cuando existe transferencia de calor por este mecanismo entre una

relative humidity and wind velocity. The parameters of the equations were obtained from the literature. The simplified diagram of blocks (Figure 2) represents the usable function of MATLAB that describes the model.

The results of the simulation of the model for the temperatures of air, roof, soil, and relative humidity were compared with the data recorded by the sensors inside the greenhouse, from which the equations of linear regression and statistical estimators were obtained, which were taken as indicators to determine the accuracy of the estimations of the measurements. The calibration and validation of the model was made using independent experimental data. The parameters chosen for the calibration were selected by inspection of the paper of the parameters of the model; a selection was made of those that are uncertain and sensitive and that have a greater effect on the performance of the system. The model was calibrated using the data measured on May 11 and 21. To obtain the fitness of the model for describing the climate, the model was simulated to validate against days 11 and 21 of June and July.

### Analysis and development of the climatic model

Although a balance can be formulated for each part of the greenhouse and its content (crop and equipment), this work describes only those of the roof, air, crop, soil and absolute humidity. For each balance, the amount of energy or mass gained minus the loss, is equal to the accumulated mass or energy. To simplify the calculations of the energy balances, the heat transfer coefficients were determined for the processes of radiation, conduction and convection (Sissom and Pitts, 1972). The flow of energy due to condensation is not taken into account in the balances, considering that the control system does not allow it to occur. Each variable and the variables used in this work are found in the Appendix.

### Heat transfer coefficients

The flow of heat by conduction through a homogeneous solid with  $dw$  thickness under temperature conditions of stationary state is as follows (Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{cond} = \alpha_{cond} (T_1 - T_2)$$

The coefficient of heat transfer by conduction is used when there is heat transfer through this mechanism in a restricted medium, and is defined as:

$$\alpha_{cond} = \frac{1}{\sum \frac{\delta}{\lambda_{cond}}} \quad (1)$$

To calculate the coefficient of heat transfer by radiation, we should consider the exchange of energy radiated between the surfaces of two opaque bodies in a greenhouse. This can be calculated with the following equation (Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{s,12} = \alpha_{s,12} (T_1 - T_2)$$

superficie sólida y el fluido en la vecindad. Éste se puede calcular así:

$$q_{conv} = \alpha_c (T_s - T_a)$$

El intercambio de calor por convección en una superficie puede formularse en términos de la relación entre los números de Nusselt (Nu), Reynolds (Re) y Prandtl (Pr) (Incropera y DeWitt, 1999). Sin embargo, las soluciones analíticas de los coeficientes de transferencia de calor están restringidos a geometrías relativamente simples. En la práctica los coeficientes de transferencia de calor para sistemas reales se evalúan con relaciones empíricas determinadas por una combinación de análisis dimensional y experimentos. Los experimentos de Bot (1983) indican una relación entre el coeficiente de transferencia de calor por convección y la velocidad del viento. Las ecuaciones 3 y 4 expresan esta relación para  $vw \leq 5 \text{ m s}^{-1}$  y  $vw \geq 5 \text{ m s}^{-1}$ .

$$\alpha_{conv} = 2.8 + 1.2v_w \quad (3)$$

$$\alpha_{conv} = 1.35 + 2.07v_w \quad (4)$$

#### Balance de energía en la cubierta

El grado de la transferencia de calor  $\alpha$ , y de la cubierta, determina la eficiencia de ésta como barrera entre el aire interior y exterior. La mayoría de las cubiertas de los invernaderos están construidos con materiales plásticos (polietileno). Estos materiales son muy delgados, por lo que la diferencia de temperatura entre el exterior e interior se puede ignorar y considerar una temperatura homogénea para la cubierta  $T_r$ . Los flujos de energía que afectan a la cubierta se deben a la convección al interior y exterior de la misma ( $q_{cub}^{conv}$ ), absorción de radiación solar ( $q_{cub}^{abs}$ ), intercambios de radiación de onda larga ( $q_{cub}^{rad}$ ) y ( $q_{cub-atm}^{rad}$ ). Cuando todos estos flujos se dividen por el área de suelo cubierto, se obtiene la ecuación (5) para el balance de energía en la cubierta (Bot, 1983; Udink Ten Cate, 1985b; Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{cub}^{rad} + q_{cub}^{abs} - q_{cub-atm}^{rad} - q_{cub}^{conv} = \delta_r A_r \rho_r C_r \frac{dT_r}{dt} \quad (5)$$

El intercambio de radiación de onda larga entre la parte interna de la cubierta con el cultivo y la superficie del suelo es (Salim, 1993; Jones *et al.*, 1994):

$$q_{cub}^{rad} = \alpha_s [F_{cr} LAI (T_c - T_r) + F_{rg} A_r (T_g - T_r)] \quad (6)$$

De la radiación solar que incide sobre la superficie de la cubierta, una parte es absorbida, otra reflejada y la restante transmitida al interior del invernadero; ésta última es reflejada nuevamente por el cultivo y la superficie del suelo. La ecuación (7) representa el total de la densidad de flujo absorbido en la cubierta (Bot, 1983; Jones *et al.*, 1994).

$$q_{cub}^{abs} = [\epsilon_r + \Gamma_c \tau_r (0.2LAI) + F_{\Gamma} \Gamma_g \tau_r (1 - 0.2LAI)] A_r R_g \quad (7)$$

The coefficient of heat transfer by radiation for two parallel surfaces is (Kreith, 1995):

$$\alpha_{s,12} = \frac{4\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1\epsilon_2} \sigma \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3 \quad (2)$$

The coefficient of heat transfer by convection is used when there is heat transfer by this mechanism between a solid surface and the fluid in the vicinity This can be calculated by:

$$q_{conv} = \alpha_c (T_s - T_a)$$

The exchange of heat by convection on a surface can be formulated in terms of the relationship among the numbers of Nusselt (Nu), Reynolds (Re) and Prandtl (Pr) (Incropera and DeWitt, 1996). However, the analytical solutions of the coefficients of heat transfer are restricted to the relatively simple geometries. In practice, the heat transfer coefficients for real systems are evaluated with empirical relationships determined by a combination of dimensional analyses and experiments. The experiments of Bot (1983) indicate a relationship between the coefficient of heat transfer by convection and the wind velocity. Equations 3 and 4 express this relationship for  $vw \leq 5 \text{ m s}^{-1}$  and  $vw \geq 5 \text{ m s}^{-1}$ .

$$\alpha_{conv} = 2.8 + 1.2v_w \quad (3)$$

$$\alpha_{conv} = 1.35 + 2.07v_w \quad (4)$$

#### Balance of energy in the roof

The degree of heat transfer  $\alpha$ , and that of the roof, determine the efficiency of this factor as a barrier between the interior and exterior air. Most of the roofs of greenhouses are constructed with plastic materials (polyethylene). These materials are very thin, thus the temperature difference between the exterior and the interior can be ignored and consider a homogeneous temperature for the roof  $T_r$ . The energy flows that affect the roof are due to the convection to the interior and exterior of the roof ( $q_{cub}^{conv}$ ), absorption of solar radiation ( $q_{cub}^{abs}$ ), exchange of long wave radiation ( $q_{cub}^{rad}$ ) and ( $q_{cub-atm}^{rad}$ ). When all of these flows are divided by the area of covered soil, equation (5) is obtained for the balance of energy in the roof (Bot, 1983; Udink Ten Cate, 1985b; Bakker *et al.*, 1995).

$$q_{cub}^{rad} + q_{cub}^{abs} - q_{cub-atm}^{rad} - q_{cub}^{conv} = \delta_r A_r \rho_r C_r \frac{dT_r}{dt} \quad (5)$$

The exchange of long wave radiation between the internal part of the roof with the crop and the surface of the soil is (Salim, 1993; Jones *et al.*, 1994):

$$q_{cub}^{rad} = \alpha_s [F_{cr} LAI (T_c - T_r) + F_{rg} A_r (T_g - T_r)] \quad (6)$$

Of the solar radiation that falls on the surface of the roof, one part is absorbed, another reflected and the rest is transmitted to the

Cualquier superficie en la tierra emite radiación (según la temperatura de la superficie) y al mismo tiempo recibe radiación de la atmósfera; este balance es la radiación neta. La radiación de onda larga que incide sobre la tierra depende del contenido de vapor de agua en la atmósfera y se expresa así (Kimura, 1979):

$$Br = a + b\sqrt{e_o}$$

(ver Apéndice)

La ecuación (8) representa el balance de absorción en la cubierta:

$$e_{cub-atm}^{rad} = \left[ \varepsilon_r + (T_r)^4 - B_r (T_o)^4 \right] \alpha A_r (1 - k_a) \quad (8)$$

La densidad de flujo de energía por convección en la cubierta del invernadero está caracterizado por el coeficiente de transferencia de calor de convección. La transferencia de calor por convección arriba y debajo de la superficie de la cubierta puede calcularse con la siguiente ecuación (Takakura, 1989; Tavares *et al.*, 2001):

$$q_{cub}^{conv} = A_r \left[ \alpha_{conv,o} (T_r - T_o) + \alpha_{conv,i} (T_r - T_i) \right] \quad (9)$$

#### Balance de energía en el aire interno

Los flujos de energía que afectan el aire interno de un invernadero se deben al proceso de convección ( $q_{int}^{conv}$ ), vía ventilación natural ( $q_{vent}$ ) y aportación del sistema de calefacción ( $q_{calef}$ ). La diferencia de flujos de calor es igual a la capacidad calorífica del aire dentro del invernadero. Este balance se puede expresar así (Salim, 1993; Jones *et al.*, 1994; Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{int}^{conv} - q_{vent} + q_{calef} = V_i \rho_a C_p \frac{dT_i}{dt} \quad (10)$$

La densidad de flujo de calor por convección del aire interno es la cantidad de calor transferido entre la cubierta, cultivo, superficie del suelo y el aire interno. Lo anterior se expresa así (Udink Ten Cate, 1985b; Takakura, 1989; Tchamitchian *et al.*, 1992):

$$q_{int}^{conv} = \alpha_{conv,i} \left[ A_r (T_r - T_i) + 2LAI (T_c - T_i) + (T_g - T_i) \right] \quad (11)$$

La convección natural pura no existe, la ventilación natural por el efecto de la temperatura es relativamente pequeño comparado con el efecto del viento; por tanto, la ventilación natural debida al efecto de la temperatura se ignorará. Si el viento sopla dentro del invernadero, se tendrá una diferencia de presiones a través de las aberturas, y habrá movimiento del aire a través del invernadero. Para simplificar los cálculos, se considera homogénea la velocidad del viento en el invernadero. De esta forma, a partir del balance de presiones se obtiene la velocidad del viento dentro del invernadero (Boulard y Baille, 1995):

$$\Delta P = s_i \frac{1}{2} \rho_a v_i^2 = \frac{1}{2} \rho_a v_w^2 - \frac{1}{2} \rho_a v_i^2$$

inside of the greenhouse; the latter is reflected again by the crop and the soil surface. Equation (7) represents the total of the flow density absorbed in the roof (Bot, 1983; Jones *et al.*, 1994).

$$q_{cub}^{abs} = \left[ \varepsilon_r + \Gamma_c \tau_r (0.2LAI) + F_r \Gamma_g \tau_r (1 - 0.2LAI) \right] A_r R_g \quad (7)$$

Any surface on the earth emits radiation (according to the surface temperature) and at the same time receives radiation from the atmosphere; this balance is the net radiation. The long wave radiation that falls on the earth depends on the water vapour content in the atmosphere and is expressed as (Kimura, 1979):

$$Br = a + b\sqrt{e_o}$$

(see appendix)

Equation (8) represents the balance of absorption in the roof:

$$e_{cub-atm}^{rad} = \left[ \varepsilon_r + (T_r)^4 - B_r (T_o)^4 \right] \alpha A_r (1 - k_a) \quad (8)$$

The flow density of energy by convection in the greenhouse roof is characterized by the coefficient of heat transfer by convection. The transfer of heat by convection above and below the surface of the roof can be calculated with the following equation (Takakura, 1989; Tavares *et al.*, 2001):

$$q_{cub}^{conv} = A_r \left[ \alpha_{conv,o} (T_r - T_o) + \alpha_{conv,i} (T_r - T_i) \right] \quad (9)$$

#### Balance of energy in the inner air

The flows of energy that affect the inside air of a greenhouse are due to the process of convection ( $q_{int}^{conv}$ ), via natural ventilation ( $q_{vent}$ ) and contribution of the heating system ( $q_{calef}$ ). The difference of heat flows is equal to the calorific capacity of the air inside the greenhouse. This balance can be expressed as (Salim, 1993; Jones *et al.*, 1994; Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{int}^{conv} - q_{vent} + q_{calef} = V_i \rho_a C_p \frac{dT_i}{dt} \quad (10)$$

The flow density of heat by convection of the inside air is the amount of heat transferred among the roof, crop, soil surface and the inside air. The above is expressed as (Udink Ten Cate, 1985b; Takakura, 1989; Tchamitchian *et al.*, 1992):

$$q_{int}^{conv} = \alpha_{conv,i} \left[ A_r (T_r - T_i) + 2LAI (T_c - T_i) + (T_g - T_i) \right] \quad (11)$$

Pure natural convection does not exist, natural ventilation by the effect of the temperature is relatively small compared with the effect of the air; therefore, the natural ventilation due to the effect of temperature will be ignored. If the wind blows inside the greenhouse, there will be a difference of pressures through the openings, and air movement will take place through the greenhouse. To simplify the calculations, the wind velocity inside the greenhouse

donde:

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{s_i + 1}} v_w$$

La cantidad de aire que fluye a través del invernadero está dada por la ecuación:

$$\phi_{v,viento} = \frac{(1-s)}{\sqrt{s_i + 1}} A_1 v_w + v_w A_{vent}$$

Por tanto, la densidad de flujo de energía por ventilación es:

$$q_{vent} = \phi_{v,viento} \rho_a C_p \frac{(T_i - T_o)}{A_g} \quad (12)$$

### Balance de energía en el cultivo

El cultivo absorbe la energía transmitida por la cubierta. El porcentaje de calor transferido y absorbido depende del coeficiente de transmisión de la cubierta y del coeficiente de emisión de las hojas. Con las superficies de los alrededores (suelo y cubierta) existe una transferencia de calor vía radiación. Todos estos flujos de calor se deben al gradiente de temperatura. Otro flujo de energía que afecta el cultivo es el del proceso de convección. Para que el cultivo mantenga una temperatura constante las hojas evaporan agua. La cantidad de calor transferido por evaporación de las hojas depende de la concentración de vapor de agua. Las densidades de flujo de calor entrantes y salientes en las hojas es igual a su capacidad de almacenar calor. En la ecuación (13) se expresan estos flujos (Salim, 1993; Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{cul}^{abs} + q_{cul}^{rad} - q_{cul}^{conv} - q_{cul}^{evap} = LAI \delta_c \rho_c C_c \frac{dT_c}{dt} \quad (13)$$

Los valores de las constantes de espesor, densidad y calor específico de la hoja, se tomaron de los experimentos de Stanghellini (1987). La densidad de transferencia de calor absorbido por el cultivo es la suma de la densidad de flujo de calor transmitido a través de la cubierta y la densidad de flujo de calor reflejado por el suelo. Este último depende del factor de reflexión del suelo ( $F_r$ ), que es un valor determinado por la combinación de los coeficientes de reflexión de la lona blanca y tezontle que cubren el suelo, de acuerdo con un porcentaje de área de suelo cubierta. La densidad de flujo de calor absorbido en el cultivo es:

$$q_{cul}^{abs} = \left[ (\epsilon_c (0.2LAI)) + (F_r \Gamma_g (1 - 0.2LAI)) \right] \tau_r R_g \quad (14)$$

El cultivo recibirá y emitirá calor de las superficies de los alrededores (cubierta y suelo). El porcentaje de energía térmica radiante emitida por una superficie depende de su temperatura absoluta. Las densidades totales de flujo de calor en el cultivo se calculan con (Takakura, 1989; Salim, 1993):

is considered homogeneous. In this way, the wind velocity inside the greenhouse is obtained from the balance of pressures (Boulard and Baille, 1995):

$$\Delta P = s_i \frac{1}{2} \rho_a v_i^2 = \frac{1}{2} \rho_a v_w^2 - \frac{1}{2} \rho_a v_i^2$$

where:

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{s_i + 1}} v_w$$

The amount of air that flows through the greenhouse is given by the equation:

$$\phi_{v,viento} = \frac{(1-s)}{\sqrt{s_i + 1}} A_1 v_w + v_w A_{vent}$$

Therefore, the flow density of energy through ventilation is:

$$q_{vent} = \phi_{v,viento} \rho_a C_p \frac{(T_i - T_o)}{A_g} \quad (12)$$

### Balance of energy in the crop

The crop absorbs the energy transmitted by the roof. The percentage of heat transferred and absorbed depends on the coefficient of transmission of the roof and of the coefficient of emission of the leaves. With the surfaces of the surroundings (soil and roof), there is a transfer of heat via radiation. All of these heat flows are due to the temperature gradient. Another energy flow that affects the crop is the flow from the convection process. In order for the crop to maintain a constant temperature, the leaves evaporate water. The amount of heat transferred by evaporation of the leaves depends on the concentration of water vapour. The flow densities of heat entering and exiting the leaves is equal to their capacity of heat storage. These flows are expressed in equation (13) (Salim, 1993; Bakker *et al.*, 1995):

$$q_{cul}^{abs} + q_{cul}^{rad} - q_{cul}^{conv} - q_{cul}^{evap} = LAI \delta_c \rho_c C_c \frac{dT_c}{dt} \quad (13)$$

The values of the constants of thickness, density and specific heat of the leaf, were taken from the experiments of Stanghellini (1987). The density of transfer of heat absorbed by the crop is the sum of the flow density of heat transmitted through the roof and the flow density of heat reflected by the soil. The latter depends on the reflection factor of the soil ( $F_r$ ), which is a value determined by the combination of the coefficients of reflection of the white canvas and tezontle that cover the soil, according to a percentage of the area of covered soil. The flow density of heat absorbed by the crop is:

$$q_{cul}^{abs} = \left[ (\epsilon_c (0.2LAI)) + (F_r \Gamma_g (1 - 0.2LAI)) \right] \tau_r R_g \quad (14)$$



$$q_{cul}^{rad} = \alpha_s LAI \left[ F_{cr} (T_r - T_c) + F_{cg} (T_g - T_c) \right] \quad (15)$$

Cuando el viento sopla encima y bajo la superficie de las hojas hay una transferencia de calor por convección multiplicado por un factor de 2. Entonces, la transferencia de calor por convección se expresa por:

$$q_{cul}^{conv} = \alpha_{conv,i} (2LAI) (T_c - T_i) \quad (16)$$

El calor transferido por el proceso de evaporación se llama calor latente. El flujo de calor latente es un índice que expresa energía consumida por unidad de área foliar para permitir que el agua se evapore. De acuerdo con Stanghellini (1987), el flujo de energía por evaporación en el cultivo se representa por:

$$q_{cul}^{evap} = \frac{2LAI \rho_a C_p}{\gamma (r_s + r_a)} (e_{d,c} - e_i) \quad (17)$$

El uso de la ecuación de transferencia de vapor para evaluar el flujo de transpiración en una hoja ideal, requiere conocer la presión de vapor de la superficie externa. Para derivar una ecuación en la que las variables de estado de la hoja no aparezcan explícitamente la presión de vapor en la hoja ( $e_{d,c}$ ) se define como:

$$e_{d,c} = e_i^* (T_c - T_i) \quad (18)$$

Sustituyendo (18) en (17) la expresión que representa la transferencia de calor por evaporación en el cultivo es:

$$q_{cul}^{evap} = \frac{2LAI \rho_a C_p}{\gamma (r_s + r_a)} \left[ \delta^* (T_c - T_i) + (e_i^* - e_i) \right] \quad (19)$$

La presión de vapor promedio del volumen de aire ( $e_i$ ) y la presión de vapor saturado ( $e_i^*$ ) se calculan con las siguientes expresiones (Hanan, 1998):

$$e_i = \frac{X_i / 18}{1/29 + X_i / 18} \cdot 10^3 \quad e_i^* = \frac{X_i^* / 18}{1/29 + X_i^* / 18} \cdot 10^5$$

#### Balance de energía en la superficie de suelo

La temperatura del suelo depende de la cantidad de calor recibida y la vía para disipar el calor. En la superficie de la tierra hay varios flujos de energía: la radiación de onda corta que penetra la cobertura y es absorbida por el suelo ( $q_{sue}^{abs}$ ), la radiación de onda larga entre los componentes opacos en el invernadero ( $q_{sue}^{rad}$ ), la transferencia de calor por convección con el aire soplando sobre la superficie del suelo ( $q_{sue}^{conv}$ ), la transferencia de calor por conducción dentro del suelo ( $q_{sue}^{cond}$ ), la transferencia de calor por evaporación en el suelo ( $q_{sue}^{evap}$ ). Considerando todos los flujos de calor,

The crop will receive and emit heat from the surfaces of the surroundings (roof and soil). The percentage of radiant thermal energy emitted by a surface depends on its absolute temperature. The total densities of heat flow in the crop are calculated with the following equation (Takakura, 1989; Salim, 1993):

$$q_{cul}^{rad} = \alpha_s LAI \left[ F_{cr} (T_r - T_c) + F_{cg} (T_g - T_c) \right] \quad (15)$$

When the wind blows over and under the surface of the leaves, there is a transfer of heat by convection multiplied by a factor of 2. Therefore, the transfer of heat by convection is expressed by:

$$q_{cul}^{conv} = \alpha_{conv,i} (2LAI) (T_c - T_i) \quad (16)$$

The heat transferred by the process of evaporation is called latent heat. The flow of latent heat is an index that expresses energy consumed per unit of leaf area to permit the evaporation of water. According to Stanghellini (1987), the flow of energy by evaporation in the crop is represented by:

$$q_{cul}^{evap} = \frac{2LAI \rho_a C_p}{\gamma (r_s + r_a)} (e_{d,c} - e_i) \quad (17)$$

The use of the equation of vapour transfer to evaluate the flow of transpiration in an ideal leaf, requires knowledge of the vapour pressure of the external surface. To derive an equation in which the variables of the state of the leaf do not appear explicitly, the vapour pressure in the leaf ( $e_{d,c}$ ) is defined as:

$$e_{d,c} = e_i^* (T_c - T_i) \quad (18)$$

Substituting (18) in (17) the expression that represents the transfer of heat through evaporation in the crop is as follows:

$$q_{cul}^{evap} = \frac{2LAI \rho_a C_p}{\gamma (r_s + r_a)} \left[ \delta^* (T_c - T_i) + (e_i^* - e_i) \right] \quad (19)$$

The average vapour pressure of the air volume ( $e_i$ ) and the saturated vapour pressure ( $e_i^*$ ) are calculated with the following expressions (Hanan, 1998):

$$e_i = \frac{X_i / 18}{1/29 + X_i / 18} \cdot 10^3 \quad e_i^* = \frac{X_i^* / 18}{1/29 + X_i^* / 18} \cdot 10^5$$

#### Balance of energy on the soil surface

The soil temperature depends on the amount of heat received and the way that the heat is dissipated. On the surface of the earth there are various energy flows: short wave radiation that penetrates the roof and is absorbed by the soil ( $q_{sue}^{abs}$ ), long wave radiation among the opaque components in the greenhouse ( $q_{sue}^{rad}$ ), energy transfer by convection with the air blowing over the surface of the

la ecuación que representa el balance de energía es (Tchamitchian *et al.*, 1992; Bakker *et al.*, 1995; Tavares *et al.*, 2001):

$$q_{sue}^{abs} + q_{sue}^{rad} - q_{sue}^{conv} - q_{sue}^{cond} - q_{sue}^{evap} = \delta_g \rho_{gr} C_{gr} \frac{dT_g}{dt} \quad (20)$$

Una parte de la radiación de onda corta que penetra la cubierta es absorbida por el suelo. Esta cantidad depende de la transmisividad de la cubierta y el coeficiente de absorción del suelo (Salim, 1993; Tavares *et al.*, 2001):

$$q_{sue}^{abs} = F_e \varepsilon_g \tau_r R_g (1 - 0.2LAI) \quad (21)$$

El suelo emite o recibe radiación de los cultivos y cubierta. La densidad de flujo total por radiación de onda larga en el suelo se expresa en la siguiente ecuación (Udink Ten Cate, 1985b; Tchamitchian *et al.*, 1992; Tavares *et al.*, 2001):

$$q_{sue}^{rad} = \alpha [LAI F_{cg} (T_c - T_g) + A_r F_{rg} (T_r - T_g)] \quad (22)$$

La transferencia de calor por convección en el suelo depende del viento que sopla sobre su superficie y la temperatura a su alrededor. La densidad de flujo de calor por convección es:

$$q_{sue}^{conv} = \alpha_{conv,i} (T_g - T_i) \quad (23)$$

El suelo debe dividirse en varias capas horizontales de temperatura homogénea, ya que si se considera una sola capa con temperatura homogénea se introduciría un error significativo al balance. En general sólo se consideran los flujos verticales a, y del suelo. Los flujos de calor en cada capa se expresan en las siguientes ecuaciones (Salim, 1993; Tavares *et al.*, 2001):

#### Superficie del suelo

$$q_{sue}^{cond} = \frac{\lambda_g}{\delta_g} (T_g - T_{g1}) \quad (24)$$

Capa 1

$$\frac{\lambda_g}{\delta_g} [(T_g - T_{g1}) + (T_{g2} - T_{g1})] = \delta_g \rho_{gr} C_{gr} \frac{dT_{g1}}{dt} \quad (25)$$

Capa 2

$$\frac{\lambda_g}{\delta_g} [(T_{g1} - T_{g2}) + (T_{g3} - T_{g2})] = \delta_g \rho_{gr} C_{gr} \frac{dT_{g2}}{dt} \quad (26)$$

Capa 3

$$\frac{\lambda_g}{\delta_g} [(T_{g2} - T_{g3}) + (T_{gw} - T_{g3})] = \delta_g \rho_{gr} C_{gr} \frac{dT_{g3}}{dt} \quad (27)$$

La superficie de la tierra donde se cultiva es húmeda, por lo que se puede aplicar la fórmula de Merkel (Hanan, 1998). Si la concentración de vapor de saturación es  $x_s$  y el calor de evaporación

soil ( $q_{sue}^{conv}$ ), heat transfer by conduction within the soil ( $q_{sue}^{cond}$ ), heat transfer through evaporation in the soil ( $q_{sue}^{evap}$ ). Considering all of the heat flows, the equation that represents the balance of energy is (Tchamitchian *et al.*, 1992; Bakker *et al.*, 1995; Tavares *et al.*, 2001):

$$q_{sue}^{abs} + q_{sue}^{rad} - q_{sue}^{conv} - q_{sue}^{cond} - q_{sue}^{evap} = \delta_g \rho_{gr} C_{gr} \frac{dT_g}{dt} \quad (20)$$

One part of the short wave radiation that penetrates the roof is absorbed by the soil. This amount depends on the transmissivity of the roof and the coefficient of absorption of the soil (Salim, 1993; Tavares *et al.*, 2001).

$$q_{sue}^{abs} = F_e \varepsilon_g \tau_r R_g (1 - 0.2LAI) \quad (21)$$

The soil emits or receives radiation from the crops and roof. The total flow density by long wave radiation in the soil is expressed by the following equation (Udink Ten Cate, 1985b; Tchamitchian *et al.*, 1992; Tavares *et al.*, 2001):

$$q_{sue}^{rad} = \alpha [LAI F_{cg} (T_c - T_g) + A_r F_{rg} (T_r - T_g)] \quad (22)$$

The transfer of heat by convection in the soil depends on the wind that blows over its surface and the temperature of the surroundings. The density of heat flow through the convection is:

$$q_{sue}^{conv} = \alpha_{conv,i} (T_g - T_i) \quad (23)$$

The soil should be divided into various horizontal layers of homogeneous temperature; given that if only one layer with homogeneous temperature is considered, a significant error would be introduced into the balance. In general, only the vertical a flows are considered, and those of the soil. The heat flows in each layer are expressed in the following equations (Salim, 1993; Tavares *et al.*, 2001):

#### Soil surface

$$q_{sue}^{cond} = \frac{\lambda_g}{\delta_g} (T_g - T_{g1}) \quad (24)$$

Layer 1

$$\frac{\lambda_g}{\delta_g} [(T_g - T_{g1}) + (T_{g2} - T_{g1})] = \delta_g \rho_{gr} C_{gr} \frac{dT_{g1}}{dt} \quad (25)$$

Layer 2

$$\frac{\lambda_g}{\delta_g} [(T_{g1} - T_{g2}) + (T_{g3} - T_{g2})] = \delta_g \rho_{gr} C_{gr} \frac{dT_{g2}}{dt} \quad (26)$$

Layer 3

$$\frac{\lambda_g}{\delta_g} [(T_{g2} - T_{g3}) + (T_{gw} - T_{g3})] = \delta_g \rho_{gr} C_{gr} \frac{dT_{g3}}{dt} \quad (27)$$

del agua es  $\lambda$ , la densidad de flujo por evaporación se expresa así (Bot, 1983; Salim, 1993; Jones *et al.*, 1994):

$$q_{sue}^{evap} = \alpha_{conv,i} F_s \frac{\lambda}{C_p} (x_g^* - x_i) \quad (28)$$

### Balance de humedad

Durante el proceso de evaporación del cultivo y del suelo se produce una gran cantidad de vapor de agua que se acumula con el tiempo y el viento transporta este vapor acumulado fuera del invernadero. El balance de masa se expresa por la ecuación (Bot, 1983; Bakker *et al.*, 1995):

$$\phi_{m,pro} - \phi_{m,salida} = V_t \rho_a \frac{dx_i}{dt} \quad (29)$$

La masa de vapor de agua en el invernadero se produce por evaporación del cultivo (19) y el suelo (28) (Hanan, 1998):

$$\phi_{m,pro} = \frac{(q_{cul}^{evap} + q_{sue}^{evap})}{\lambda} \quad (30)$$

La transferencia de masa (cantidad de vapor) por el movimiento del aire en el invernadero se representa en la ecuación 31 (Bot, 1983; Tchamitchian *et al.*, 1992; Salim, 1993):

$$\phi_{m,salida} = \frac{\phi_w}{A_g} \rho_a (x_i - x_o) \quad (31)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se muestran datos estadísticos de las simulaciones del modelo para un día de abril de 2002. El ajuste del modelo para las diferentes variables, definido por el coeficiente de determinación  $R^2$ , es bajo. Esto se debe a que el modelo en este trabajo está basado en parámetros reportados en la literatura, lo cual implica que el significado de los parámetros en el modelo y también la estructura del mismo puede cambiar. Por tanto, es necesario calibrar el modelo desarrollado.

Realizado el análisis de sensibilidad, los parámetros seleccionados para calibrar fueron: factor de nubosidad  $K_a$ , calor específico de la hoja  $C_c$ , factor de fricción  $F_o$ , calor específico de la cubierta  $C_r$ , coeficiente de reflexión del suelo  $\Gamma_g$ , coeficiente de absorción del suelo  $\varepsilon_g$ . El análisis de sensibilidad de un modelo climático reportado por Van Henten (2000) muestra que estos parámetros están involucrados en la calibración. Los parámetros seleccionados fueron ajustados hasta que la simulación de las temperaturas del aire, cubierta, cultivo, suelo y humedad relativa produjeron un ajuste aceptable contra sus valores medidos. Aunque es posible obtener un buen ajuste cuando se calibra el

The surface of the soil where the crop is grown is wet, thus the Merkel (Hanan, 1998) formula can be applied. If the saturation concentration of vapour is  $x_s$  and the heat of water evaporation is  $\lambda$ , the flow density by evaporation is expressed as (Bot, 1983; Salim, 1993; Jones *et al.*, 1994):

$$q_{sue}^{evap} = \alpha_{conv,i} F_s \frac{\lambda}{C_p} (x_g^* - x_i) \quad (28)$$

### Moisture balance

During the evaporation process of the crop and the soil, a large amount of water vapour is produced that accumulates over time; the wind transports this accumulated vapour out of the greenhouse. The balance of mass is expressed by the following equation (Bot, 1983; Bakker *et al.*, 1995).

$$\phi_{m,pro} - \phi_{m,salida} = V_t \rho_a \frac{dx_i}{dt} \quad (29)$$

The mass of water vapour in the greenhouse is produced by evaporation of the crop (19) and the soil (28) (Hanan, 1998):

$$\phi_{m,pro} = \frac{(q_{cul}^{evap} + q_{sue}^{evap})}{\lambda} \quad (30)$$

The transfer of mass (amount of vapour) by the movement of the air in the greenhouse is represented in equation 31 (Bot, 1983; Tchamitchian *et al.*, 1992; Salim, 1993):

$$\phi_{m,salida} = \frac{\phi_w}{A_g} \rho_a (x_i - x_o) \quad (31)$$

## RESULTS AND DISCUSSION

Statistical data from the simulations of the model for a day of April, 2002, are shown in Table 1. The fit of the model for the different variables, defined by the determination coefficient  $R^2$ , is low. This is due to the fact that the model in this work is based on parameters reported in the literature, which implies that the significance of the parameters in the model and also its structure may change. Consequently, the developed model needs to be calibrated.

When the sensitivity analysis had been made, the parameters selected to be calibrated were as follows: cloudiness factor  $K_a$ , specific heat of the leaf  $C_c$ , friction factor  $F_o$ , specific heat of the roof  $C_r$ , coefficient of reflection of the soil  $\Gamma_g$ , coefficient of absorption of the soil  $\varepsilon_g$ . The sensitivity analysis of a climatic model reported by Van Henten (2000) shows that these parameters are involved in the calibration. The selected parameters were adjusted until the simulations of the temperatures of the air, roof, crop, soil and relative humidity produced an

**Cuadro 1. Ecuaciones de regresión lineal y valores de  $R^2$  para un día de abril de 2002.**  
**Table 1. Linear regression equations and  $R^2$  values for a day in April 2002.**

	Variables de estado				
	Temperatura de la cubierta ( $T_r$ )	Temperatura del aire ( $T_i$ )	Temperatura del cultivo ( $T_c$ )	Temperatura del suelo ( $T_g$ )	Humedad Relativa ( $H_r$ )
Ecuación de regresión lineal	$y = 0.416x + 9.020$	$y = 0.616x + 10.213$	$y = 1.878x - 9.332$	$y = 0.259x + 8.812$	$y = 1.138x - 35.289$
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.650	0.835	0.702	0.517	0.765

modelo para un conjunto de datos, ésto no garantiza que el modelo sea satisfactorio, especialmente cuando el número de parámetros es grande comparado con el conjunto de datos. La última evaluación de la calibración es la validación, que es la comparación de los resultados de la simulación con las mediciones no usadas para calibrar el modelo.

En los Cuadros 2 y 3 se muestran los datos estadísticos resultantes de las simulaciones después de la calibración y para la validación. En el Cuadro 2 se observa un incremento del coeficiente de determinación para  $T_i$  y  $H_r$ , así como para  $T_r$ ,  $T_s$  y  $T_c$ , aunque no de igual proporción que para las primeras. En el Cuadro 3 se observa que los coeficientes de determinación de  $T_i$ ,  $H_r$ ,  $T_r$ ,  $T_s$  y  $T_c$  para la validación son muy similares a los del periodo de calibración.

En las Figuras 3, 4 y 5 se muestran las gráficas de dispersión con su regresión lineal, así como las gráficas de simulación en tiempo de las diferentes variables para 288 muestras, correspondientes a la columna de día I del Cuadro 3. Para la temperatura de la cubierta

acceptable fit against their measured values. Although it is possible to obtain a good fit when the model is calibrated for a group of data, this does not guarantee that the model will be satisfactory, especially when the number of parameters is large compared to the group of data. The last evaluation of the calibration is the validation, which is the comparison of the results of the simulation with the measurements not used to calibrate the model.

The statistical data resulting from the simulations after the calibration and for the validation are shown in Tables 2 and 3. In Table 2, an increase is observed in the determination coefficient for  $T_i$  and  $H_r$ , as well as for  $T_r$ ,  $T_s$  and  $T_c$ , although not of the same proportion as for the first ones. In Table 3, it can be observed that the determination coefficients of  $T_i$ ,  $H_r$ ,  $T_r$ ,  $T_s$  and  $T_c$  for the validation are very similar to those of calibration period.

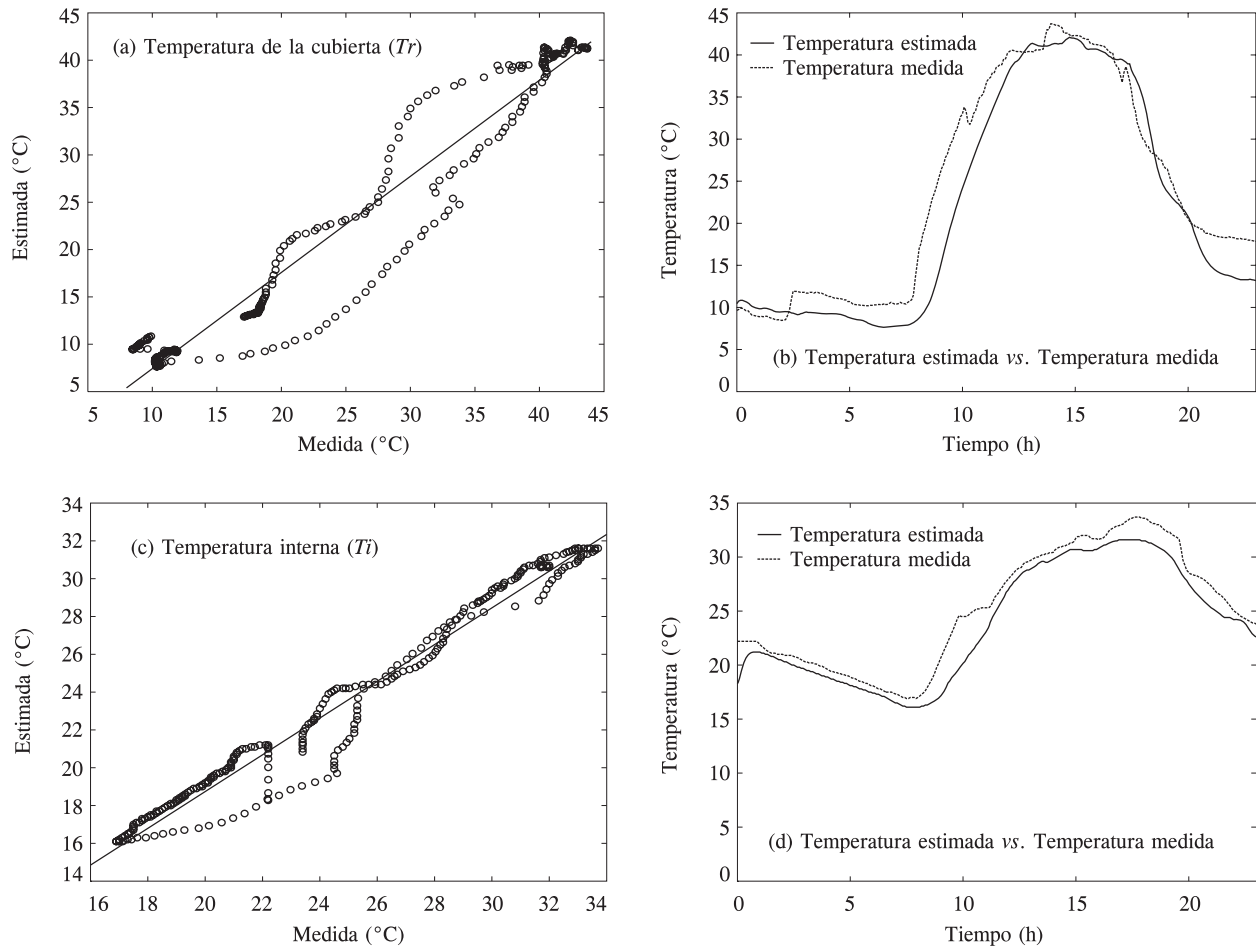
In Figures 3, 4 and 5 are shown the dispersion graphs with their linear regression, as well as the graphs of simulation in time of the different variables

**Cuadro 2. Ecuaciones de regresión lineal y valores de  $R^2$  para dos días de mayo de 2002.**  
**Table 2. Linear regression equations and  $R^2$  values for two days in May 2002.**

	Día I		Día II	
	Ecuación de regresión	$R^2$	Ecuación de regresión	$R^2$
Temperatura de la cubierta ( $T_r$ )	$y = 1.923x - 7.182$	0.811	$y = 1.854x + 8.010$	0.822
Temperatura del aire ( $T_i$ )	$y = 0.848x + 5.357$	0.858	$y = 0.944x + 0.695$	0.957
Temperatura del cultivo ( $T_c$ )	$y = 1.547x + 9.511$	0.824	$y = 0.783x + 6.137$	0.810
Temperatura del suelo ( $T_g$ )	$y = 0.374x + 9.087$	0.678	$y = 0.391x + 9.038$	0.677
Humedad relativa ( $H_r$ )	$y = 0.892x + 6.784$	0.948	$y = 1.054x + 2.582$	0.977

**Cuadro 3. Ecuaciones de regresión lineal con valores de  $R^2$  para un día de junio y uno de julio.**  
**Table 3. Linear regression equations and  $R^2$  values for a day in June and one in July.**

	Día I		Día II	
	Ecuación de regresión	$R^2$	Ecuación de regresión	$R^2$
Temperatura de la cubierta ( $T_r$ )	$y = 1.400x - 5.212$	0.853	$y = 0.771x + 2.583$	0.841
Temperatura del aire ( $T_i$ )	$y = 0.976x + 1.152$	0.964	$y = 0.962x + 1.371$	0.958
Temperatura del cultivo ( $T_c$ )	$y = 1.930x + 3.292$	0.835	$y = 1.477x + 2.131$	0.830
Temperatura del suelo ( $T_g$ )	$y = 0.410x + 8.356$	0.714	$y = 0.562x + 6.223$	0.703
Humedad relativa ( $H_r$ )	$y = 0.899x + 0.966$	0.960	$y = 0.947x + 1.921$	0.944



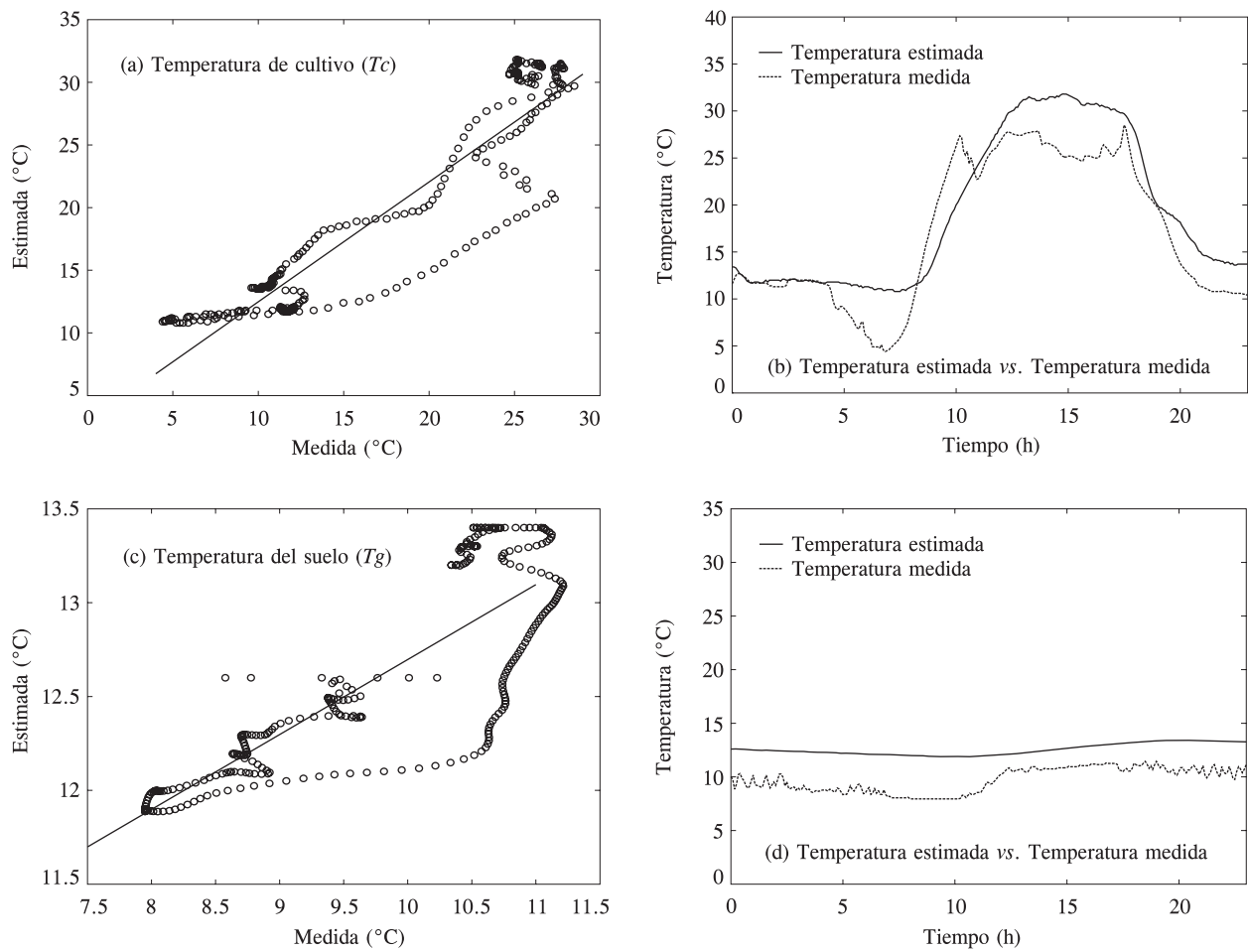
**Figura 3. Resultados de la validación del modelo clima para las temperaturas de la cubierta ( $T_r$ ) e interna ( $T_i$ ).**  
**Figure 3. Results of weather model validation for roof ( $T_r$ ) and inner temperatures ( $T_i$ ).**

(Figura 3b), durante las horas del día cuando el sol es más intenso el modelo tiene una predicción regular; sin embargo, de 03:00 a 12:00 h y de 19:00 a 23:59 h hay un diferencial de temperatura de hasta cinco grados menor a las mediciones. Ésto puede deberse a un alto coeficiente de transferencia de calor por convección, un alto coeficiente de transferencia de calor por radiación principalmente durante la noche y a la incertidumbre en el valor del factor de nubosidad. Tchamitchian *et al.* (1992), concluyeron que este último factor genera cierta incertidumbre en el balance de energía en la cubierta, cuando es sólo estimado y no medido. Sin embargo, Tap (2000) obtuvo un comportamiento semejante de la  $T_r$  al ignorar la dinámica de la cubierta del invernadero, donde se desconoce la radiación de onda larga.

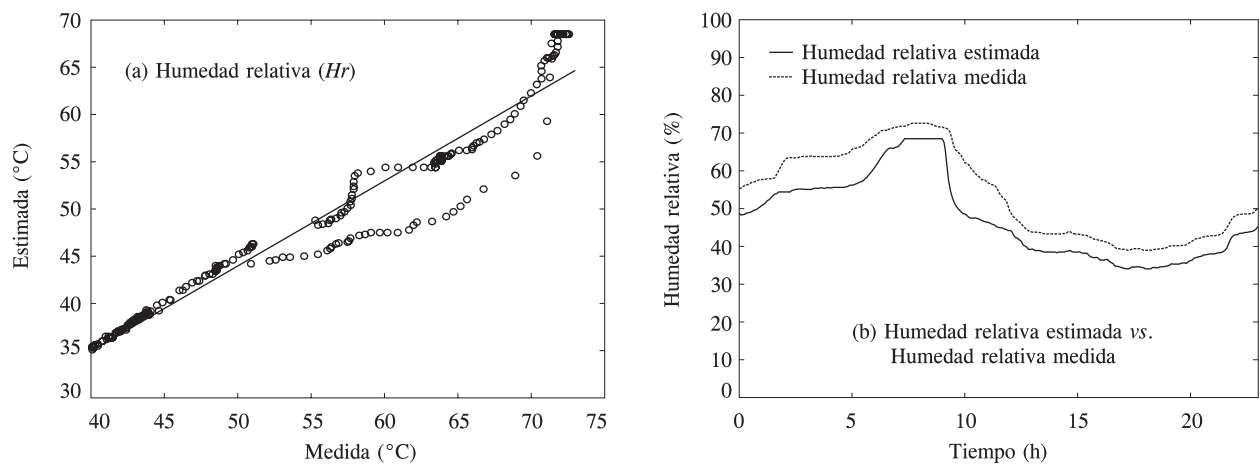
En la Figura 3d se aprecia una buena aproximación del modelo de la temperatura del aire interno. La diferencia aproximadamente constante por debajo de las mediciones durante el día, excepto en pocas horas, puede deberse a la consideración de un coeficiente

for 288 samples, corresponding to the column of day I of Table 3. For the roof temperature (Figure 3b), during the hours of the day in which the sun is most intense, the model has a regular prediction; however, from 03:00 to 12:00 hr and from 19:00 to 23:59 h, there is a temperature differential of up to five degrees below the measurements. This could be due to a high coefficient of heat transfer by convection, a high coefficient of heat transfer through radiation mainly during the night and to the uncertainty in the value of the cloudiness factor. Tchamitchian *et al.* (1992) concluded that this last factor generates uncertainty in the energy balance in the roof, when it is only estimated and not measured. However, Tap (2000) obtained a similar performance of the  $T_r$  when ignoring the dynamics of the greenhouse roof, where the long wave radiation is unknown.

In Figure 3d it is shown a good approximation of the model of the inner air temperature. The difference approximately constant below the measurements throughout the day, except in a few hours, may be due



**Figura 4. Resultados de la validación del modelo clima para las temperaturas del cultivo ( $T_c$ ) y del suelo ( $T_g$ ).**  
**Figure 4. Results of the weather model validation for crop ( $T_c$ ) and soil ( $T_g$ ) temperatures.**



**Figura 5. Resultados de la validación del modelo del clima para la humedad relativa ( $H_r$ ).**  
**Figure 5. Results of the weather model validation for relative humidity ( $H_r$ ).**

muy pequeño de suelo-aire, cubierta-aire y cultivo-aire; a la no consideración de la condensación y transferencia de calor por convección baja. Similarmente, el intercambio de calor con el aire exterior puede estar subestimado por el modelo, así como el error que se puede introducir debido a que no siempre el control realizado es igual al computado.

En la Figura 4b se muestra que no hay una buena predicción del modelo de la temperatura del cultivo. Esto puede deberse a los coeficientes de transferencia de calor involucrados, la velocidad de aire interno puede no ser calculada correctamente por el modelo debido al factor de fricción de la malla y del mismo cultivo, lo que genera un cálculo equivocado de la transferencia de calor por convección. La consideración del cultivo como una gran hoja y el uso de un sensor sólo en una planta puede ser otro factor que afecte la estimación en el modelo de esta variable. Salim (1993) obtuvo un comportamiento similar de su modelo para esta variable bajo condiciones climáticas distintas.

Para la temperatura del suelo los coeficientes de determinación (Cuadros 2 y 3) son los más bajos. En la Figura 4d se muestra una baja predicción de esta variable, con un diferencial de temperatura de hasta seis grados sobre las mediciones. Esto se puede deber a que los coeficientes de transferencia de calor involucrados son altos, la transferencia de calor por convección es alta y en este balance no se considera totalmente el efecto de la lona que cubre el suelo. Tap (2000) encontró un comportamiento análogo en su modelo para la  $T_g$ , por lo que consideró a ésta como virtual.

En la Figura 5b se muestra una buena aproximación del modelo de la humedad relativa, debido a que el valor de  $H_r$  depende de  $T_i$  y  $x_i$ , esta última estimada directamente por el modelo. Por tanto, que los errores relativos de  $H_r$  dependen de los errores relativos de  $T_i$  y  $x_i$ ; más aún, la subestimación y fluctuaciones obtenidas por el modelo de  $H_r$  durante el día, pueden ser causadas por una baja estimación de la transpiración, al no considerar el agua estancada en las líneas de desagüe que se evapora ni la condensación.

En estudios similares Tap (2000) y Van Henten (1994) encontraron un comportamiento semejante en su modelo climático para las variables de humedad relativa ( $H_r$ ) y temperatura interna ( $T_i$ ) en el invernadero. En el presente estudio el modelo desarrollado se analizó bajo condiciones climáticas distintas (*i.e.* un alta incidencia de radiación solar), situación contraria a las condiciones usadas por los autores citados.

Los resultados de la calibración y validación del modelo son satisfactorios, sobre todo para las variables  $T_i$  y  $H_r$ , para las que se obtuvieron coeficientes de correlación altos (Cuadro 3). Dada la complejidad

to the consideration of a very small coefficient of soil-air, roof-air and crop-air; to the lack of consideration of the condensation and transfer of heat through low convection. Similarly, the exchange of heat with the external air may be underestimated by the model, as well as the error that can be introduced due to the fact that not always the control made is equal to the control that is computed.

There is not a good prediction of the model of the crop temperature as shown in Figure 4b. This may be due to the coefficients of heat transfer involved, the velocity of inside air may not be correctly calculated by the model due to the friction factor of the screen and of the crop itself, which results in a bad calculation of the transfer of heat through convection. The consideration of the crop as a large leaf and the use of a sensor only in one plant may be another factor that affects the estimation in the model of this variable. Salim (1993) obtained a similar performance of his model for this variable under different climatic conditions.

For the soil temperature, the determination coefficients (Tables 2 and 3) are the lowest. A low prediction of this variable is shown in Figure 4d, with a temperature differential of up to six degrees above the measurements. This could be due to the fact that the coefficients of heat transfer involved are high, the transfer of heat through convection is high and in this balance the effect of the canvas that covers the soil is not considered totally. Tap (2000) found an analogous performance in his model for  $T_g$ , thus it was considered as virtual.

In Figure 5b it is shown a good approximation of the model of relative humidity, due to the fact that the value of  $H_r$  depends on  $T_i$  and  $x_i$ , the latter estimated directly from the model. Therefore, the relative errors of  $H_r$  depend on the relative errors of  $T_i$  and  $x_i$ ; moreover, the underestimation and fluctuations obtained by the model of  $H_r$  during the day, may be caused by a low estimation of transpiration, the lack of consideration of the water that is stagnant in the drainage lines that evaporates or of condensation.

In similar studies, Tap (2000) AND Van Henten (1994) found a similar behaviour in their climatic model for the variables of relative humidity ( $H_r$ ) and inside temperature ( $T_i$ ) in the greenhouse. In the present study, the developed model was analyzed under different climatic conditions (*i.e.*, a high incidence of solar radiation), a situation which is contrary to the conditions used by the cited authors.

The results of the calibration and validation of the model are satisfactory, mainly for the variables  $T_i$  and  $H_r$ , for which high correlation coefficients were

del sistema tratado y la variación en las mediciones involucradas, así como las consideraciones realizadas, el modelo nunca será muy preciso. Van Henten (1994) y Tap (2000) obtuvieron resultados similares del comportamiento de las variables climáticas en el invernadero, usando las variables  $H_r$  y  $T_i$  para desarrollar controladores óptimos del clima en invernadero.

Hay varias razones para explicar las desviaciones remanentes entre el modelo y las mediciones: 1) la precisión de los sensores; 2) para escoger los parámetros de calibración correctos se debe encontrar una combinación de parámetros que permitan ajustar simultáneamente todas las variables de estado, lo cual es complicado; 3) se supone que el invernadero es un tanque de mezclado perfecto (*i. e.* el aire del invernadero es un fluido perfectamente mezclado), cuando en realidad se tiene una distribución espacial; 4) las mediciones en la planta son poco precisas debido a una gran variación entre plantas individuales bajo las mismas condiciones.

Los resultados de la calibración probablemente mejorarán al incrementar la exactitud de las mediciones, realizar la calibración en un camino formal, hacer mediciones continuas del cultivo, incrementar el número de muestras y usar modelos más avanzados para la ventilación, evapotranspiración (Stanghellini, 1987), así como integrar en el modelo el proceso de condensación (Tap, 2000).

El modelo es válido sólo bajo condiciones normales de operación. Ésto es, el modelo es menos confiable para temperaturas y velocidades del viento extremas. En los análisis de modelos climáticos realizados por Bot (1983) y Van Henten (1994), se concluyó que este tipo de modelos son fuertemente influenciados por la velocidad del viento.

## CONCLUSIONES

El modelo dinámico del clima presentado en este trabajo es una herramienta confiable para la predicción de la temperatura interna y humedad relativa en un invernadero. Éste se puede utilizar en estudios de control climático, optimización, análisis y diseño de invernaderos en México. El modelo permite predecir el comportamiento del invernadero en condiciones climáticas de la región central del país, ya que se puede observar la influencia de la variación de las condiciones climáticas externas en cada una de las partes del invernadero.

## LITERATURA CITADA

Bakker, J., G. Bot, H. Challa, and N. V. deBraak. 1995. Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach. Wageningen Press. The Netherlands. 279 p.

obtained (Table 3). Given the complexity of the system used and the variation in the measurements involved, as well as the considerations made, the model will never be very precise. Van Henten (1994) and Tap (2000) obtained similar results of the behaviour of the climatic variables in the greenhouse, using the variables  $H_r$  and  $T_i$  to develop optimum controllers of climate in a greenhouse.

There are various reasons to explain the deviations remaining between the model and the measurements: 1) the precision of the sensors; 2) to choose the correct calibration parameters a combination of parameters should be found that make it possible to adjust all of the variables of state simultaneously, which is complicated; 3) it assumes that the greenhouse is a tank of perfect mixture (*i. e.*, the air of the greenhouse is a perfectly mixed fluid), when in reality there is a spatial distribution; 4) the measurements in the plant are not very precise, given that there is a great variation among the individual plants under the same conditions.

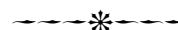
The results of the calibration will probably be improved by increasing the accuracy of the measurements, making the calibration in a formal way, making continuous measurements of the crop, increasing the number of samples and using more advanced models for ventilation, evapo-transpiration (Stanghellini, 1987), as well as integrating the condensation process in the model (Tap, 2000).

The model is only valid under normal conditions of operation. That is, the model is less reliable for extreme temperatures and wind velocities. In the analyses of climatic models carried out by Bot (1983) and Van Henten (1994), it was concluded that these types of models are strongly influenced by wind velocity.

## CONCLUSIONS

The dynamic model of climate presented in this study is a reliable tool for the prediction of the inside temperature and relative humidity in a greenhouse. It can be used in studies of climatic control, optimization, analysis and design of greenhouses in México. The model makes it possible to predict the behaviour of the greenhouse under climatic conditions of the central region of the country, given that we can observe the influence of the variation of the external climatic conditions in each one of the parts of the greenhouse.

—End of the English version—





- Bot, G. P. A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. PhD thesis, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 240 p.
- Boulard, T., and A. Bailie. 1995. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *J. Agric. Eng. Res.* 61: 37-48.
- Challa, H. 1990. Crop growth models for greenhouse climate control. *Theoretical Production Ecology*, pp: 125-145.
- Cunba, J. B., A. Ruano, and C. Couta. 1992. Identification of greenhouse climate dynamic models. *Computer in Agric.* 43: 1-10.
- Hanan, J. 1998. Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture. First edition. CRC Press. New York. 684 p.
- Incropera, F. P., y D. P. DeWitt. 1999. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ª edición. Prentice Hall. México. 912 p.
- Jones, J. W., Y. K. Hwang, and I. Seginer. 1994. Simulation of greenhouse crops, environment and control. *Acta Horticulturae*, 399: 73-86.
- Kimura, K. 1979. Scientific Basis of Air Conditioning. Applied Science Publishers Ltd. London.
- Kreith, F. 1995. Transmisión de Calor por Radiación. Primera Edición. C.E.C.S.A. México. 281 p.
- LEIDLO (Dutch Agricultural Economics Research Institute). 1996. Holland Statistics. The Netherlands. 24 p.
- Matallana, A., y J. Montero. 1995. Invernaderos: Diseño, Construcción y Ambientación. 2ª edición. Ed. Mundi-Prensa. España. 209 p.
- Salim, A. 1993. Greenhouse for tropical regions. PhD thesis, Technische Universiteit Delft. The Netherlands. 106 p.
- Sissom, L. E., and D. R. Pitts. 1972. Elements of Transport Phenomena. First edition. McGraw-Hill. New York. 814 p.
- Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management. PhD thesis, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 150 p.
- Takakura, T. 1989. Technical models of greenhouse environment. *Acta Horticulturae*. 248: 49-54.
- Tap, F. 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 127 p.
- Tavares, C., A. Goncalves, P. Castro, D. Loureiro, and A. Joyce. 2001. Modelling an agriculture production greenhouse. *Renewable Energy*. 22: 15-20.
- Tchamitchian, M., L. G. van Willigenburg, and G. van Straten. 1992. Short term dynamic optimal control of the greenhouse climate. *MRS report*. The Netherlands. 92: 3.
- Udink Ten Cate, A. J. 1983. Simulation models for greenhouse climate control. *In: Proceedings, 7th IFAC Symposium. Identification and System Parameter Estimation*, York, England. Pergamon, Oxford. 11 p.
- Udink Ten Cate, A. J. 1985a. Analysis and synthesis of greenhouse climate controllers. Dissertation. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 159 p.
- Udink Ten Cate, A. J. 1985b. Modelling and simulation in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae* 174: 461-467.
- Van-Henten, E. J. 1994. Greenhouse climate management: an optimal control approach. PhD thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 328 p.
- Van-Henten, E. J. 2000. Sensitivity analysis of an optimal control problem in greenhouse climate management. *Biosystems Eng.* 85: 335-364.

Apéndice

$\alpha_c$	coeficiente de transferencia de calor por convección	$W m^{-2}$	$e_i^*$	presión de vapor saturado en la superficie externa de la hoja	Pa
$\alpha_{cond}$	coeficiente de transferencia de calor por conducción	$W m^{-2}$	$F_\varepsilon$	factor del coeficiente de absorción del suelo	0.07
$\alpha_{conv, o}$	coeficiente de transferencia de calor por convección exterior	$W m^{-2}$	$F_\Gamma$	factor del coeficiente de reflexión del suelo	0.91
$\alpha_{conv, j}$	coeficiente de transferencia de calor por convección interior	$W m^{-2}$	$F_{cg}$	factor de visibilidad cultivo-suelo	0.80
$\alpha_s$	coeficiente de transferencia de calor por radiación	$W m^{-2}$	$F_{cr}$	factor de visibilidad cultivo-cubierta	0.65
$\alpha_{s, 12}$	coeficiente de transferencia de calor por radiación entre dos superficies	$W m^{-2}$	$F_{rg}$	factor de visibilidad cubierta-suelo	0.35
$\beta$	coeficiente de expansión térmica del aire	K	$F_o$	factor de fricción de la ventana	3.55
$\gamma$	constante termodinámica	Pa K	$k_a$	nubosidad	0.05
$\delta$	Espesor	m	$LAI$	índice de área foliar	$0 < LAI < 4$
$\delta_c$	espesor de la hoja	0.02 m	$q_{calef}$	Flujo de calor por calefacción	$W m^{-2}$
$\delta_g$	espesor de la primera capa de suelo	m	$q_{cub}^{rad}$	Flujo de calor por radiación en la cubierta	$W m^{-2}$
$\delta_r$	espesor de la cubierta	m	$q_{cub}^{abs}$	Flujo de calor total absorbido por la cubierta	$W m^{-2}$
$\delta^*$	pendiente de la presión de vapor saturado en la hoja	Pa K	$q_{cub-atm}^{rad}$	Flujo de calor radiado neto entre cubierta y atmósfera	$W m^{-2}$
$\Delta P$	diferencia de presión entre las aperturas de las ventanas	Pa	$q_{cub}^{conv}$	Flujo de calor por convección en la cubierta	$W m^{-2}$
$\varepsilon_c$	coeficiente de absorción del cultivo	0.80	$q_{int}^{conv}$	Flujo de calor por convección en el aire interno	$W m^{-2}$
$\varepsilon_g$	coeficiente de absorción del suelo	0.83	$q_{cul}^{abs}$	Flujo de calor total absorbido por el cultivo	$W m^{-2}$
$\varepsilon_r$	factor de absorción de la cubierta	0.08	$q_{cul}^{rad}$	Flujo de calor por radiación en el cultivo	$W m^{-2}$
$\varepsilon_1$	coeficiente de absorción de la superficie 1	--	$q_{cul}^{conv}$	Flujo de calor por convección en el cultivo	$W m^{-2}$
$\varepsilon_2$	coeficiente de absorción de la superficie 2	--	$q_{cul}^{evap}$	Flujo de calor por evaporación del cultivo	$W m^{-2}$
$\xi_c$	factor de fricción dependiente de el índice de área foliar	--	$q_{s,12}$	Flujo de calor por radiación de la superficie 1 a la superficie 2	$W m^{-2}$
$\lambda$	calor latente de vaporización del agua	$J kg^{-1}$	$q_{sue}^{abs}$	Flujo de calor resultante de la absorción en el suelo	$W m^{-2}$
$\lambda_a$	conductividad térmica del aire	$W m^{-2} K$	$q_{sue}^{rad}$	Flujo de calor por radiación en el suelo	$W m^{-2}$
$\lambda_{cond}$	conductividad térmica	$W m^{-2} K$	$q_{sue}^{conv}$	Flujo de calor por convección en el suelo	$W m^{-2}$
$\lambda_g$	conductividad térmica del suelo	$W m^{-2} K$	$q_{sue}^{cond}$	Flujo de calor por conducción en el suelo	$W m^{-2}$
$\rho_a$	densidad del aire	$kg m^{-3}$	$q_{sue}^{evap}$	Flujo de calor por evaporación en el suelo	$W m^{-2}$
$\rho_c$	densidad de la hoja	$700 kg m^{-3}$	$q_{vent}$	Flujo de calor por ventilación	$W m^{-2}$
$\rho_{gr}$	densidad del suelo	$1500 kg m^{-3}$	$r_a$	resistencia aerodinámica de las hojas	$s m^{-1}$

$\rho_r$	densidad de la cubierta	1900 kg m <sup>-3</sup>	$r_s$	resistencia estomática de las hojas	s m <sup>-1</sup>
$\Gamma_c$	coeficiente de reflexión del cultivo	0.05	$R_g$	radiación global	W m <sup>-2</sup>
$\Gamma_g$	coeficiente de reflexión del suelo	0.08	$s$	factor de superficie	m m <sup>-1</sup>
$\sigma$	constante de Stefan Boltzmann	5.67×10 <sup>-8</sup> W m <sup>-2</sup>	$T_a$	temperatura del fluido(aire)	K
$\tau_r$	coeficiente de transmisividad de la cubierta	0.9	$T_c$	temperatura del cultivo	K
$\phi_{m, pro}$	vapor de agua producido en el invernadero	kg s <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	$T_g$	temperatura del suelo	K
$\phi_{m, salida}$	vapor de agua saliente del invernadero	kg s <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	$T_{g1}$	temperatura de la capa 1 de suelo	K
$\phi_{v, viento}$	flujo de aire a través de las ventanas laterales	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	$T_{g2}$	temperatura de la capa 2 de suelo	K
$a$	constante	0.51	$T_{g3}$	temperatura de la capa 3 de suelo	K
$A_g$	superficie de suelo cubierta	m <sup>2</sup>	$T_{gw}$	temperatura del agua en el suelo	K
$A_r$	índice de relación de la cubierta a el área de suelo	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	$T_i$	temperatura interna	K
$A_{vent}$	sección de área de apertura extra	m <sup>2</sup>	$T_o$	temperatura externa	K
$A_1$	área de sección transversal del invernadero	m <sup>2</sup>	$T_r$	temperatura de la cubierta	K
$b$	constante	0.066 m bar	$T_s$	temperatura de la superficie	K
$B_r$	número de Brunt		$T_1$	temperatura de la superficie 1	K
$C_c$	calor específico de la hoja	3.5×10 <sup>-3</sup> Jkg <sup>-1</sup> K	$T_2$	temperatura de la superficie 2	K
$C_{gr}$	calor específico del suelo	1200 Jkg <sup>-1</sup> K	$v_i$	velocidad promedio del aire en el invernadero	m s <sup>-1</sup>
$C_p$	calor específico del aire a presión constante	Jkg <sup>-1</sup> K	$v_w$	velocidad del viento	m s <sup>-1</sup>
$C_r$	calor específico de la cubierta	600 J kg <sup>-1</sup> K	$V_l$	razón del volumen de aire a el área de suelo	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup>
$e_{d, c}$	presión de vapor promedio en la hoja	Pa	$x_i$	humedad absoluta del aire interno	kg m <sup>-3</sup>
$e_i$	presión de vapor promedio en el volumen de aire	Pa	$x_o$	humedad absoluta externa	kg m <sup>-3</sup>
$e_o^*$	presión externa de vapor de agua del aire saturado	Pa	$x_i^*$	humedad absoluta de saturación del volumen de aire a una temperatura	kg m <sup>-3</sup>
$e_o$	presión externa de vapor de agua del aire	Pa	$x_g^*$	humedad absoluta de saturación a una temperatura en el suelo	kg m <sup>-3</sup>