

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

**MODELOS PARA SIMULACIÓN Y CONTROL DEL CLIMA
DE UN INVERNADERO CON VENTILACIÓN NATURAL**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS

PRESENTA:

AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

JULIO DE 2009

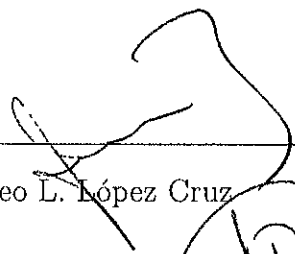
Chapingo, Estado de México

**MODELOS PARA SIMULACIÓN Y CONTROL DEL CLIMA
DE UN INVERNADERO CON VENTILACIÓN NATURAL**

Tesis realizada por Agustín Ruiz García bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

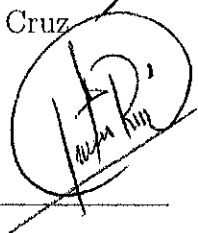
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS**

DIRECTOR:



Dr. Irineo L. López Cruz

ASESOR:



Dr. J. Armando Ramírez Arias

ASESOR:



Dr. Ramón Arteaga Ramírez

AGRADECIMIENTOS

Por este medio deseo agradecer a las personas e instituciones que hicieron posible mi formación y la realización del presente trabajo, entre ellos:

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo económico recibido para la culminación de éste trabajo de investigación a través de una Beca Tesis de Posgrado.

Al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de maestría.

Al Dr. Irineo L. López Cruz, que con su acertada dirección, consejo y sugerencias hizo posible la culminación de éste trabajo.

Al Dr. J. Armando Ramírez Arias y Dr. Ramón Arteaga Ramírez, por el paciente trabajo de revisión y atinadas sugerencias para mejorar el mismo.

A todas aquellas personas que de manera desinteresada me brindaron su apoyo en la realización del presente trabajo.

“With four parameters I can fit an elephant, and with five I can make him wiggle his trunk”

–Von Neumann–

DATOS BIOGRÁFICOS

Nace el 26 de mayo de 1973 en la comunidad de La Unión Zaragoza, Nochixtlán, perteneciente a la región mixteca en el estado de Oaxaca. Realiza sus estudios de preparatoria agrícola y la licenciatura en la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el título de Ingeniero en Irrigación en el año 2005.

Colaboró en el Centro de Cómputo Universitario de la Universidad Autónoma Chapingo, en el área de administración de servidores UNIX/LINUX, administración de sitios web y en capacitación a personal administrativo y alumnos. También ha participado en varias ocasiones en la evaluación nacional del Programa del Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC) de la SAGARPA.

Sus áreas de investigación son la agrometeorología, y la modelación y control en biosistemas.

MODELOS PARA SIMULACIÓN Y
CONTROL DEL CLIMA DE UN
INVERNADERO CON VENTILACIÓN
NATURAL

Agustín Ruiz García^a
Irineo L. López Cruz^b

La industria de los invernaderos en México ha crecido a un gran ritmo durante los últimos cinco años. Más del 60 % de los invernaderos mexicanos tienen condiciones de medio y bajo nivel tecnológico, caracterizados por el uso de ventilación natural para refrescar el invernadero y de calentadores de gas para evitar las heladas. En la presente investigación se desarrollaron dos modelos dinámicos del clima de un invernadero. Un modelo de simulación que describe el comportamiento de las variables contenido de humedad y temperatura del aire, temperatura de la cubierta y temperatura de varias capas del suelo. Además otro modelo simplificado para propósitos de control, que describe las variables contenido de humedad y temperatura del aire. El comportamiento de los dos modelos fue comparado contra datos recolectados en un invernadero de tipo cenital ubicado en Chapingo, México. Los modelos fueron calibrados usando los algoritmos de Mínimos Cuadrados, Evolución Diferencial y Estrategias Evolutivas con matriz de covarianza. Los resultados mostraron que los modelos simulan de manera aceptable el clima del invernadero con ventilación natural y por lo tanto pueden utilizarse para el estudio de estrategias de manejo y en el diseño de sistemas de control, para mejorar el ambiente de un invernadero.

Palabras clave: Invernaderos, modelos matemáticos, computación evolutiva, tomate.

^aTesista
^bDirector

CLIMATE SIMULATION AND CONTROL
MODELS FOR GREENHOUSES WITH
NATURAL VENTILATION

Agustín Ruiz García^a
Irineo L. López Cruz^b

The Mexican greenhouse industry has grown at a fast rate during the last five years. More than 60 % of Mexican greenhouses have medium and low technological conditions, characterized by the use of natural ventilation to cool the greenhouse and gas heaters to avoid freezing temperatures. In this research, two dynamic greenhouse climate models were developed. A simulation model was developed which describes the behavior of the following variables: humidity content, air temperature, covering temperature, and the temperature of several soil layers. In addition, a simplified model was created for control purposes; it describes the humidity content and air temperature variables. The behavior of the two models was compared against data collected in a zenithal-type greenhouse located in Chapingo, Mexico. Both models were calibrated using Least Squares, Differential Evolution and Evolution Strategies with covariance matrix, algorithms. Results showed that both models simulate in an acceptable manner the climate of a greenhouse with natural ventilation and therefore they can be applied to study management strategies and also design control systems in order to improve the environment of a greenhouse.

Keywords: Greenhouses, mathematical models, evolutionary computation, tomato.

^aThesis author
^bThesis director

ÍNDICE GENERAL

Resumen	v
Índice de cuadros	viii
Índice de figuras	x
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Revisión de Literatura	3
2.1. Modelado del clima de un invernadero	3
2.1.1. Modelación matemática de sistemas físicos	3
2.1.2. Balances de energía y masa de un invernadero	5
2.1.3. Procesos físicos en un invernadero	6
2.2. Computación evolutiva	20
2.2.1. Estrategias evolutivas	23
2.2.2. Evolución diferencial	25
2.3. Estimación de parámetros	28
2.3.1. Selección de parámetros a estimar	28
2.3.2. Estimación y validación	30
Capítulo 3. Materiales y Métodos	33
3.1. Localización y descripción del invernadero	33
3.2. Adquisición de datos	34
3.3. Modelo para simulación del clima del invernadero	35
3.3.1. Supuestos de modelado	35
3.3.2. Estados, entradas de control y entradas externas	36

ÍNDICE GENERAL – *Continuación*

3.3.3. Modelado de la humedad del aire	38
3.3.4. Modelado de la temperatura de la cubierta	42
3.3.5. Modelado de la temperatura del aire	45
3.3.6. Modelado de la temperatura del suelo	47
3.4. Modelo simplificado para control del clima del invernadero	50
3.4.1. Supuestos de modelado	51
3.4.2. Modelado de la humedad del aire	52
3.4.3. Modelo de la temperatura del aire	54
3.4.4. Modelado de la temperatura del suelo	56
Capítulo 4. Resultados y Discusión	58
4.1. Modelo para simulación del clima del invernadero	58
4.2. Modelo simplificado para control del clima del invernadero	67
Capítulo 5. Conclusiones	82
Bibliografía	85
Apéndice A. Notación	92
Apéndice B. Implementación C-MEX S-function del modelo para si- mulación del clima del invernadero	96
Apéndice C. Implementación C-MEX S-function del modelo para con- trol del clima del invernadero	107

ÍNDICE DE CUADROS

2.1. Algoritmos de evolución diferencial más ampliamente utilizados (López, 2005).	28
3.1. Convención de la notación utilizada en la descripción del modelo de simulación.	37
3.2. Estados, entradas de control y entradas externas del modelo de simu- lación.	37
4.1. Valores nominales y estimados de los parámetros seleccionados del modelo de simulación con los métodos Evolución Diferencial y CMA- ES (3 al 5 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A.	63
4.2. Ecuaciones de regresión lineal y valores de los índices estadísticos resultado del proceso de calibración del modelo para simulación del invernadero (3 al 5 de marzo de 2007). La descripción de los paráme- tros está en el apéndice A	66
4.3. Ecuaciones de regresión lineal y valores de los índices estadísticos resultado del proceso de validación del modelo de simulación del in- vernadero (del 27 de febrero al 1 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A	70
4.4. Valores nominales y estimados de los parámetros del modelo para control del invernadero, usando la función <code>lsqnonlin</code> , Evolución Di- ferencial y CMA-ES (3 al 5 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A.	76

ÍNDICE DE CUADROS – *Continuación*

4.5. Ecuaciones de regresión lineal y valores de los índices estadísticos resultado del proceso de calibración del modelo para control del in- vernadero (3 al 5 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A	77
4.6. Ecuaciones de regresión lineal y valores de los índices estadísticos resultado del proceso de validación del modelo para control del inver- nadero (del 27 de febrero al 1 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A	78
A.1. Símbolos y variables del modelo del clima del invernadero.	92
A.2. Flujos de masa [kg s^{-1}] del modelo del clima del invernadero.	94
A.3. Flujos de calor [W] del modelo del clima del invernadero.	94
A.3. Flujos de calor	95

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Esquema de la distribución de presión interior $P_{in}(z)$ (línea delgada), presión exterior $P_{ex}(z)$ (línea gruesa) y velocidad del aire (vectores) en una abertura de altura H	18
2.2. Estructura general de un algoritmo evolutivo.	22
3.1. Invernadero tipo cenital con ventilación natural donde se realizaron las mediciones.	34
3.2. Estados x (línea continua), entradas externas w (línea punteada) y entradas de control u (línea-punto) en el modelo de simulación del invernadero.	38
4.1. Entradas externas w utilizados en la calibración del modelo de simulación (3 al 5 de marzo de 2007), datos recolectados en Chapingo, México.	60
4.2. Entradas de control u utilizados en la calibración del modelo de simulación (3 al 5 de marzo de 2007).	61
4.3. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura de cubierta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo de simulación con el algoritmo DE (3 al 5 de marzo de 2007).	64
4.4. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura de cubierta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo de simulación con el algoritmo CMA-ES (3 al 5 de marzo de 2007).	65

ÍNDICE DE FIGURAS – *Continuación*

4.5. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura de cubierta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo de simulación con el algoritmo Evolución Diferencial (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).	68
4.6. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura de cubierta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo de simulación con el algoritmo CMA-ES (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).	69
4.7. Entradas externas w utilizados en la calibración del modelo para control (3 al 5 de marzo de 2007), datos colectados en Chapingo, México.	71
4.8. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo para control con la función <code>lsqnonlin</code> (3 al 5 de marzo de 2007).	73
4.9. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo para control con el algoritmo Evolución Diferencial (3 al 5 de marzo de 2007).	74
4.10. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo para control con el algoritmo CMA-ES (3 al 5 de marzo de 2007).	75
4.11. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo para control con la función <code>lsqnonlin</code> (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).	79

ÍNDICE DE FIGURAS – *Continuación*

4.12. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo para control con el algoritmo Evolución Diferencial (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).	80
4.13. Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo para control con el algoritmo CMA-ES (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).	81

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La industria de los invernaderos en México ha crecido a un gran ritmo durante los últimos cinco años (Romero *et al.*, 2006). En 2003, se estimó que la superficie con agricultura bajo cubierta estaba compuesta por invernaderos con cubierta de plástico (54 %), casas sombra (44 %), invernaderos con cubierta de vidrio (2 %), y otras (1 %). La porción del área de invernaderos que contaban con sistemas de control ambiental activo se estimó alrededor de una tercera parte (Cook y Calvin, 2005). Más del 60 % de los invernaderos mexicanos tienen condiciones de medio y bajo nivel tecnológico, caracterizados por el uso de ventilación natural y de calentadores de gas para evitar las heladas (Romero *et al.*, 2006).

Lopez y Shwedel (2001) mencionan que las hortalizas de mayor importancia producidas en invernadero son tomate (60 % del área total de invernadero), pepinos (20 %) y pimiento (10 %). El rendimiento promedio del tomate en invernadero en México en 2003 se estimó en 156 toneladas por hectárea, comparado con cerca de 500 en los Estados Unidos y Canada, 93 en España y 456 en los Países Bajos (Cook y Calvin, 2005). Estos rendimientos relativamente bajos se deben principalmente a la diferencia tecnológica y el conocimiento desarrollado en otros países en el área de ingeniería de invernaderos adecuada a sus características (Castañeda-Miranda *et al.*, 2007).

Las investigaciones enfocadas al desarrollo de modelos del clima reflejan conocimiento científico de forma cuantitativa, y pueden usarse para diseñar herramientas de ingeniería para invernaderos (Castañeda-Miranda *et al.*, 2007). El requerimiento

esencial de los modelos del clima es el definir cómo las condiciones en el interior del invernadero son influenciadas por el clima exterior, el diseño del invernadero, y el sistema de control del clima. Los modelos deben entonces, describir la penetración de radiación solar dentro del invernadero, los balances de calor y masa de los elementos que constituyen el sistema invernadero, y las características de los sistemas de control del clima (Bailey, 1991). Los modelos del clima son una herramienta que se utiliza en el diseño de invernaderos, y en el análisis y diseño de nuevos algoritmos y métodos de control (Bakker *et al.*, 1995).

Modelos derivados en principios físicos o mecanicistas tanto estáticos (Garzoli y Blackwell, 1981; Boulard y Baille, 1993; Impron *et al.*, 2007) como dinámicos (Takakura *et al.*, 1971; Bot, 1983; de Halleux, 1989; de Zwart, 1996) con diferentes grados de complejidad han sido desarrollados por diferentes autores. Los modelos más comprensivos contienen un gran número de coeficientes y parámetros cuyos valores en ocasiones no son conocidos con gran precisión.

El primer objetivo de la presente investigación fue desarrollar y calibrar dos modelos dinámicos derivados de principios físicos para un invernadero: un modelo de simulación relativamente complejo y otro modelo simplificado para propósitos de control. El modelo de simulación considera las variables contenido de humedad, temperatura del aire, temperatura de la cubierta y del suelo. El modelo simplificado considera solamente la temperatura del aire y la humedad. Ambos modelos son aplicables a los invernaderos característicos de la región de Texcoco, México; y consideran las características del invernadero y del cultivo, el clima exterior y la operación del invernadero. El segundo objetivo fue evaluar el desempeño de los algoritmos de evolución diferencial y estrategias evolutivas como una alternativa a los métodos de búsqueda local para calibrar modelos dinámicos no lineales, como es el caso de los modelos del clima desarrollados.

Capítulo 2

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MODELADO DEL CLIMA DE UN INVERNADERO

2.1.1. Modelación matemática de sistemas físicos

Un modelo es una descripción formal de los elementos esenciales de un sistema de interés. Su propósito es usualmente ayudar a explicar, entender o mejorar un sistema. Alvarez y Alvarez (1985) mencionan que el modelado o construcción de modelos es una metodología experimental y aplicada que tiene como objetivos:

- Describir el comportamiento de los sistemas.
- Construir teorías o hipótesis que ayuden a la comprensión del comportamiento observado.
- Usar estas teorías para describir comportamientos futuros (predicción).

Un modelo puede servir para dos propósitos fundamentales: uno descriptivo, para explicar o entender; uno prescriptivo, para predecir o duplicar las características de un comportamiento dado. Un modelo de un sistema es exitoso si abre el camino para mejorar la precisión para representar la realidad (Moreno, 2007).

Los modelos matemáticos son aquellos en los que la representación de las propiedades del sistema se realiza mediante símbolos, y las relaciones entre propiedades por expresiones matemáticas.

La construcción de un modelo requiere de la aplicación de un conjunto de leyes fundamentales de la física, de la química y de la biología. Estas leyes dadas por ecuaciones, se agrupan en ecuaciones de continuidad, de energía, de movimiento, de estado, de equilibrio, de cinética química, de transporte, etc. Cuando el transporte de

cantidades físicas como energía y masa es considerado, para estas cantidades la ley de conservación es válida para cualquier volumen. En el contexto de un invernadero las ecuaciones de interés son las de continuidad y de energía.

Al realizar un balance de energía y masa, cualquier parte del invernadero o el invernadero completo puede actuar como un cuerpo individual o volumen (Bakker *et al.*, 1995). El balance de energía Q_h [J] para cualquier volumen se puede establecer, en términos generales como:

$$\frac{dQ_h}{dt} = q_{ing,h} - q_{sal,h} + p_h \quad (2.1)$$

donde el término del lado izquierdo es el cambio de energía por unidad de tiempo en el volumen, $q_{ing,h}$ [J s^{-1}] es el flujo de energía que ingresa al volumen, $q_{sal,h}$ [J s^{-1}] es el flujo de energía que abandona el volumen, y p_h [J s^{-1}] es la energía producida en el volumen considerado. En el balance de energía (2.1) se asume que el volumen no realiza trabajo sobre sus alrededores, lo que en general es verdadero para la situación de un invernadero.

La cantidad de energía en el volumen Q_h [J] está relacionado directamente a la temperatura T [K] del volumen a través de su capacidad térmica C_{ap} [J K^{-1}]:

$$Q_h = C_{ap} T \quad (2.2)$$

De esta forma, la tasa de cambio en el tiempo de la energía interna es trasladado a una tasa de cambio en el tiempo de temperatura que puede ser implementado en el balance:

$$C_{ap} \frac{dT}{dt} = q_{ing,h} - q_{sal,h} + p_h \quad (2.3)$$

Así, la tasa de cambio en el tiempo de la temperatura de un volumen con una dada capacidad de calor C_{ap} depende de los flujos de entrada y salida, y de la tasa de producción de energía.

El cambio en el tiempo de la masa Q_m [kg] en un volumen considerado se puede establecer como:

$$\frac{dQ_m}{dt} = q_{ing,m} - q_{sal,m} + p_m \quad (2.4)$$

donde $q_{ing,m}$ [kg s⁻¹] es el flujo de masa que ingresa, $q_{sal,m}$ [kg s⁻¹] es el flujo de masa que sale, y p_m [kg s⁻¹] es la masa producida por unidad de tiempo en el volumen. En el contexto de un invernadero los balances de vapor de agua y CO₂ son de especial interés.

La masa Q_m en el volumen está directamente relacionado a la concentración c_m [kg m⁻³] y el volumen V [m³]:

$$Q_m = V c_m \quad (2.5)$$

Por lo que la Ecuación (2.4) se transforma en:

$$V \frac{dc_m}{dt} = q_{ing,m} - q_{sal,m} + p_m \quad (2.6)$$

Por tanto, la tasa de cambio en el tiempo de la concentración en un volumen V depende de las entradas y salidas y de la tasa de producción de masa.

2.1.2. Balances de energía y masa de un invernadero

Con la descripción cuantitativa de los principales procesos de intercambio los balances de energía y masa pueden ser calculados para el sistema invernadero. Usando el mismo enfoque el balance puede establecerse sobre partes representativas y homogéneas del invernadero, tales como la cubierta, aire del invernadero, cultivo y capas del suelo. Los balances de masa de vapor de agua y dióxido de carbono deben establecerse sobre el compartimiento(s) de aire solamente.

El balance de energía para el compartimiento i con temperatura T_i , intercambiando energía con un compartimiento j con temperatura T_j , puede ser representado en forma general como:

$$(\rho C_p h)_i \frac{dT_i}{dt} = \sum (-\Phi_{h,ij}) - L E_i + S_i \quad (2.7)$$

donde h [m] es la razón de volumen a área del compartimiento, S_i [W m⁻²] es la radiación solar absorbida en el compartimiento i , y $L E_i$ [W m⁻²] es la energía necesaria para transpiración en el compartimiento i . La densidad de flujo de energía

$\Phi_{h,ij}$ entre el compartimiento i y j por varios mecanismos de transporte puede ser relacionado a las temperaturas. Esto conduce a la expresión general:

$$(\rho C_p h)_i \frac{dT_i}{dt} = \sum \alpha_{h,ij} (T_j - T_i) - L E_i + S_i \quad (2.8)$$

Aquí $\alpha_{h,ij}$ está determinado por el tipo de mecanismo y generalmente contendrá una no linealidad. En esta notación las condiciones de contorno se consideran que son las temperaturas de los compartimientos circundantes.

El mismo enfoque se aplica al balance de masa (agua y dióxido de carbono) sobre el aire del compartimiento:

$$h_i \frac{dc_i}{dt} = \sum [k_{m,ij} (c_j - c_i)] \quad (2.9)$$

El balance de agua se relaciona con el balance de energía a través del término $L E_i$ en el que la densidad de flujo de agua evaporada E_i se combina con el calor de transpiración L .

Los balances de energía y masa para todos los compartimientos resulta en un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, describiendo las variables de estado temperatura y concentración de masa en los compartimientos como funciones del tiempo con condiciones iniciales y de frontera dadas.

2.1.3. Procesos físicos en un invernadero

2.1.3.1. *Conducción*

Siempre que existe un gradiente de temperatura en un medio sólido, el calor fluirá de la región con mayor temperatura a la región con menor temperatura. La transferencia de calor unidimensional estacionario por conducción $Q_{A,B}$ [W] entre dos puntos A y B en un medio homogéneo es descrito por la ecuación

$$Q_{A,B} = A_{A,B} \frac{\lambda}{d} (T_A - T_B) \quad (2.10)$$

donde $A_{A,B}$ [m²] es el área superficial para la transferencia de calor, λ [W m⁻¹ K⁻¹] es la conductividad térmica del medio homogéneo, d [m] es la distancia entre los puntos A y B , y T_A y T_B [K] son las temperaturas de A y de B .

2.1.3.2. *Convección*

Convección es la transferencia de calor entre un sólido y un gas o material fluido. La razón de transferencia de calor por convección Q_{A_B} [W] entre una superficie A y un fluido B se calcula con la relación:

$$Q_{A_B} = A_{A_B} \alpha_{A_B} (T_A - T_B) \quad (2.11)$$

donde A_{A_B} [m²] es el área de transferencia de calor, α_{A_B} [W m⁻² K⁻¹] es el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio, T_A [K] es la temperatura superficial del sólido, y T_B [K] es la temperatura del fluido en un lugar específico.

2.1.3.3. *Absorción de radiación solar*

Para la radiación de onda corta, la cantidad de energía radiante absorbido Q_{rd_A} [W] por un objeto A es descrito por la ecuación

$$Q_{rd_A} = A_A \eta_{A_{Is}} I_o \quad (2.12)$$

donde A_A [m²] es el área superficial para la transferencia de calor, $\eta_{A_{Is}}$ [—] es el coeficiente de absorción de radiación de onda corta de A y I_o [W m⁻²] es la radiación solar de onda corta exterior.

2.1.3.4. *Absorción de radiación térmica*

En la transferencia de radiación térmica en un invernadero se hacen las siguientes suposiciones: cada superficie se comporta como un cuerpo gris (propiedades de radiación térmica es independiente de la longitud de onda: emisividad es igual a la absorptancia), se asume para cada superficie *absortancia + reflectancia + transmitancia = 1* o *emitancia + reflectancia + transmitancia = 1*, y que el aire no participa en los intercambios de radiación térmica.

Para absorción de radiación térmica, la transferencia de calor Q_{A_B} [W] del objeto A al objeto B se describe por la ecuación (Stefan-Boltzmann)

$$Q_{A_B} = A_{A_B} E_A E_B F_{A_B} \sigma (T_A^4 - T_B^4) \quad (2.13)$$

donde $A_{A,B}$ [m^2] es el área de la superficie para transferencia de calor, E_A y E_B [—] son los coeficientes de emisión para A y B , $F_{A,B}$ [—] es el factor de vista de A a B , σ [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$] es la constante de Stefan-Boltzmann, y T_A y T_B [K] son las temperaturas de A y de B .

2.1.3.5. Transpiración del cultivo

La absorción de agua y transpiración tienen un importante papel en el crecimiento y desarrollo de cultivos hortícolas, asegurando el transporte de nutrimentos desde el suelo hacia los órganos de las plantas (Jolliet, 1994). La transpiración también enfría las hojas durante periodos radiantes mediante la remoción de calor latente por evaporación. Mucha transpiración, sin embargo, puede resultar en estrés para las plantas. Humedad también interactúa con la fotosíntesis y la producción de materia seca tanto afectando el desarrollo de área de hoja o modificando la conductancia estomática.

Existen muchos enfoques para estimar la evapotranspiración indirectamente a partir de tanto modelos empíricos o modelos basados físicamente usando datos meteorológicos fáciles de obtener. El enfoque empírico usa análisis de regresión para identificar correlaciones entre parámetros de entrada y tasa de transpiración. La deficiencia de este enfoque es que las fórmulas empíricas desarrollados para una región climática específica, durante un periodo de tiempo específico, puede no siempre ser preciso para otros periodos de tiempo y regiones (Prenger *et al.*, 2002). Modelos físicamente basados que usan balances de energía típicamente proporcionan una estimación más generalizada de la transpiración. Sin embargo, la desventaja de estos modelos es que tienen requerimientos de datos que muchas veces no están disponibles o no son medidos.

Cuando existe suficiente agua en el suelo o en el sustrato y los estomas están totalmente abiertos, las condiciones atmosféricas controlan la tasa de transpiración. Los más importantes factores ambientales que afectan la tasa de transpiración son

la temperatura, humedad, irradiancia solar y velocidad del viento (Salisbury y Ross, 1992).

Varias correlaciones entre transpiración y condiciones climáticas han sido determinadas para diferentes cultivos en invernadero. De acuerdo con Jolliet (1993), estas correlaciones experimentales muestran que la transpiración es principalmente afectada por la radiación solar y por el déficit de presión de vapor del aire interior del invernadero. Para el cultivo de tomate se encontró que la concentración de CO₂, temperatura de la tubería de calefacción y la conductividad de la solución nutritiva tienen poca influencia en la transpiración. La transpiración E [mg m⁻² s⁻¹] puede expresarse como:

$$E = \alpha R_i + \beta (e_{si} - e_i) \quad (2.14)$$

donde R_i [W m⁻²] es la radiación solar en el interior del invernadero y $(e_{si} - e_i)$ [Pa] es el déficit de presión de vapor del aire interior del invernadero (la diferencia entre e_{si} la presión de vapor a saturación y e_i la presión de vapor).

La transpiración también se puede estimar con la conocida ecuación de Penman-Monteith:

$$L E = \frac{s R_n + (2 LAI \rho_a C_p D) / r_b}{s + \gamma (1 + r_l / r_b)} \quad (2.15)$$

donde $L \cdot E$ [W m⁻²] es la densidad de flujo de calor latente por transpiración, E [kg m⁻² s⁻¹] es la densidad de flujo de vapor, D [Pa] es el déficit de presión de vapor del aire, R_n [W m⁻²] es la radiación neta que absorbe el cultivo, LAI [m²(hoja) m⁻²(suelo)] es el índice de área foliar, r_b [s m⁻¹] la resistencia aerodinámica, r_l [s m⁻¹] la resistencia de la hoja, γ [Pa K⁻¹] es la constante psicrométrica termodinámica, s [Pa K⁻¹] es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación; L [J kg⁻¹] es el calor latente de evaporación del agua; C_p [J kg⁻¹ K⁻¹] es el calor específico del aire a presión constante, y ρ [kg m⁻³] es la densidad del aire.

Stanghellini (1987) realizó una extensa evaluación del modelo Penman-Monteith para un cultivo de tomate en invernadero. El modelo de Stanghellini incluye términos

de resistencia interno y externo así como un más complejo cálculo de radiación solar y térmica derivado a partir de características empíricas de absorción de radiación de onda corta y larga en un dosel de varias capas (Prenger *et al.*, 2002). Stanghellini y de Jong (1995) presentan la ecuación de Penman-Monteith en la siguiente forma:

$$E = \frac{\varepsilon r_b R_n / L + 2 LAI (\chi_a^* - \chi_a)}{(1 + \varepsilon) r_b + r_l} \quad (2.16)$$

donde ε es la tasa de cambio de contenido de calor latente con contenido de calor sensible del aire saturado, χ_a [kg m⁻³] es el contenido de vapor del aire interior del invernadero y el superíndice * indica saturación. El cálculo de los parámetros de la ecuación, R_n , r_b y r_s , para el caso especial del cultivo de tomate en invernadero se presenta a continuación como se describe en (Stanghellini y de Jong, 1995).

La radiación neta de un cultivo homogéneo se determina considerando al cultivo como un medio semi-transparente:

$$\begin{aligned} R_n &= F \{ (1 + \tau_s \rho_g) [(1 - \tau_s) - (1 - \tau_l) \rho_\infty] I_s + \\ &\quad + (1 - \tau_l) [\sigma (T_u^4 + T_d^4 - 2 T_c^4)] \} \\ &= F \{ (1 + C_1) [C_2 - C_3 \rho_\infty] I_s + C_3 [I_l] \} \end{aligned} \quad (2.17)$$

donde I_s [W m⁻²] es la radiación solar incidente en la parte superior del dosel. Los grupos de coeficientes pueden ser explicados como sigue: C_3 es la cubierta del suelo, que también es el área que intercambia radiación térmica (I_l), $C_3 \rho_\infty$ es la fracción reflejada de la radiación interceptada, C_2 es la absorción de la radiación solar y C_1 representa la radiación transmitida de la que llega a la base del dosel debido a reflectancia del suelo. La transmitancia del dosel a la radiación de onda larga y corta τ_l y τ_s respectivamente, están dados por:

$$\begin{aligned} \tau_l &= \exp(-k_l LAI) \\ \tau_s &= \exp(-k_s LAI) \end{aligned} \quad (2.18)$$

donde k_l/k_s es la razón de los coeficientes de extinción de la radiación térmica y radiación solar. ρ_∞ es la reflectancia del dosel y ρ_g es la reflectancia del plástico

blanco con el que se cubre el suelo. El intercambio de radiación térmica, I_l [W m^{-2}], se calcula a través de T_c , que es la temperatura media del follaje, y T_u y T_d , que son las temperaturas aparentes de la radiación que alcanza la parte superior e inferior del follaje, respectivamente.

El factor F toma en cuenta la reducción en absorción debido a la forma de hileras del dosel:

$$F = [1 - 0.07(1 - b)(4.7 - a)] \frac{1 - 0.64 \tau_l^{1.18b} - 0.36 \tau_l^{-2.75b}}{1 - 0.64 \tau_l^{1.18} - 0.36 \tau_l^{2.75}} \quad (2.19)$$

donde b y a son la razón del ancho y alto de una hilera, respectivamente, a la distancia entre los centros de hileras adjuntas.

La resistencia de capa límite r_b [s m^{-1}] de una hoja individual dentro de un dosel en invernadero se describe por un modelo en régimen convección-mixta. Con una dimensión característica de hoja d [m] y una velocidad de aire u [m s^{-1}], la resistencia está dado por:

$$r_b = \frac{1174 d^{0.5}}{(d |T_c - T_a| + 207 u^2)^{0.25}} \quad (2.20)$$

donde T_a [$^{\circ}\text{C}$] es la temperatura ambiente.

La resistencia estomática se calcula con el modelo multiplicativo de Jarvis:

$$r_l = r_{\min} f(\bar{I}_s) f(T_c) f(\chi_c - \chi_a) \quad (2.21)$$

con

$$\begin{aligned} f(\bar{I}_s) &= \left[\frac{\bar{I}_s + 4.30}{\bar{I}_s + 0.54} \right] \\ f(T_c) &= \left[\frac{\exp(0.3 T_c) + 258}{\exp(0.3 T_c) + 27} \right] \\ f(\chi_c - \chi_a) &= \left\{ 4 \times 10^{-3} + \exp[-0.73 (\chi_c - \chi_a)] \right\}^{-1/4} \end{aligned}$$

donde $r_{\min}$ [s m^{-1}] es la resistencia estomática mínima, $\bar{I}_s$ es la radiación de onda corta promedio por unidad de área de hoja, T_c [$^{\circ}\text{C}$] la temperatura del dosel y χ [g m^{-3}] es la concentración de vapor.

Para el cultivo de tomates, Joliet (1994) desarrolló una relación lineal basado en el modelo detallado de Stanghellini. La tasa de transpiración total es expresado como sigue:

$$E = \frac{a}{\lambda} R_i + \frac{h_t}{\lambda \gamma} (e_{si} - e_i) \quad (2.22)$$

con

$$a = c_1 \ln(1 + c_2 LAI^{c_3}) \quad (2.23)$$

$$h_t = c_4 LAI (1 - c_5 \exp(-R_i/c_6))$$

donde R_i [W m^{-2}] es la radiación solar en el interior del invernadero, e_{si} [Pa] es la presión de vapor a saturación del aire en el interior del invernadero, e_i [Pa] es la presión de vapor del aire en el interior, λ [MJ kg^{-1}] es el calor latente de evaporación del agua, γ [Pa K^{-1}] es la constante psicrométrica, c_1 a c_6 son constantes. La precisión del modelo lineal en predecir la transpiración es similar al modelo de Stanghellini, mientras es simple y lineal con respecto al déficit de presión de vapor.

2.1.3.6. Evaporación y condensación de vapor de agua

Las leyes físicas que gobiernan la condensación son una extensión natural de aquellas para evaporación. Evaporación ocurre cuando la temperatura superficial es mayor que la temperatura de punto de rocío del aire, y la condensación ocurre cuando lo opuesto es verdadero. Las analogías existentes entre la difusión térmica y molecular a través de la capa límite, permite considerar los procesos de condensación y evaporación como un proceso de convección, por lo que las ecuaciones que los describen son similares.

La cantidad de agua condensada sobre la superficie de un objeto E_c [kg s^{-1}] es proporcional a la diferencia entre la humedad del aire C_a [kg m^{-3}] y la humedad de saturación a la temperatura de la superficie del objeto C_A^* [kg m^{-3}]:

$$E_c = A_A k_{a-A} (C_a - C_A^*) \quad (2.24)$$

donde k_{a-A} [m s^{-1}] es el coeficiente de transferencia de masa y A_A [m^2] es el área de la superficie del objeto. Si la humedad de saturación de la superficie del objeto es mayor

que la humedad del aire circundante ($C_A^* > C_a$), no se presenta la condensación de agua sobre la superficie del objeto.

Estos procesos provocan un intercambio de calor denominado calor latente, $Q_{lt(A)}$ [W m^2], que representa la transmisión de calor desde o hacia una superficie de un determinado objeto cuando el vapor se evapora o se condensa, quedando descrita por la ecuación:

$$Q_{lt(A)} = L E_c \quad (2.25)$$

donde L [J kg^{-1}] es el calor latente de evaporación del agua.

En el balance energético de un invernadero, los cambios de fases importantes que se producen relacionados con los procesos de calor latente son la condensación en la cara exterior e interior de la cubierta, evaporación en la superficie del suelo y evaporación en superficies libres de agua, evaporación de las paredes húmedas y sistemas de nebulización.

En la actualidad, con los nuevos métodos de crecimiento en que los sustratos están contenidos en bolsas, con películas plásticas cubriendo el suelo, con canales cerrados (sistema NFT), con riego por goteo, la superficie húmeda es pequeña y la pérdida por evaporación es mínima (Jolliet, 1999). Únicamente en el caso de riego por aspersión es que la evaporación del suelo llega a ser una parte esencial del ciclo del agua y debe ser incluido en los cálculos.

La cantidad de vapor de agua agregado al aire por el sistema de nebulización, E_{add} , depende de su tamaño y del periodo de operación. Éste es por consiguiente determinado por el procedimiento de control. La masa de vapor de agua agregado o removido por humidificación o deshumidificación E_{add} [$\text{kg}(\text{agua}) \text{s}^{-1}$], puede definirse como:

$$E_{add} = A_s \frac{u_{dt}}{L} \quad (2.26)$$

donde u_{dt} es el flujo de calor latente en [W m^{-2}] y A_s [m^2] es el área de piso del invernadero.

2.1.3.7. Ventilación natural

En la situación de ventilación de invernaderos, pueden hacerse algunas suposiciones para determinar un modelo que cubra el dominio de interés. Estas consideraciones son: a) flujo en estado estacionario; b) flujo inviscoso, c) flujo homogéneo; y d) flujo gravitacional.

Tomando en cuenta las suposiciones (a)–(b), la integración de la ecuación de momentum para el fluido sobre una línea de corriente entre dos puntos A y B, con coordenadas verticales Z_a y Z_b , resulta

$$P_A + \rho g Z_A + \frac{1}{2} \rho u_A^2 = P_B + \rho g Z_B + \frac{1}{2} \rho u_B^2 = \text{constante} \quad (2.27)$$

donde ρ es la densidad del fluido, u la velocidad del fluido (el módulo del vector velocidad $\mathbf{u}$), P la presión y g es la aceleración gravitacional. Esta ecuación es la forma bien conocida de la ecuación de Bernoulli para flujos inviscosos.

La suposición de un flujo inviscoso conduce a la ausencia de cualquier disipación de energía utilizada para vencer las fuerzas de fricción en el flujo. Es muy importante tomar en cuenta la disipación de energía en muchas situaciones prácticas donde la viscosidad del fluido no puede ser ignorado. Una forma simple de tomar en cuenta este término en la Ecuación (2.27) es expresar la pérdida de energía entre los puntos A y B como una pérdida de carga. La determinación experimental de la pérdida de carga generalmente se hace por mediciones de presión.

Esando una pérdida de presión ΔP_{AB} , la Ecuación (2.27) se transforma en:

$$P_A + \rho g Z_A + \frac{1}{2} \rho u_A^2 = P_B + \rho g Z_B + \frac{1}{2} \rho u_B^2 + \Delta P_{AB} = \text{constante} \quad (2.28)$$

Esta pérdida de presión ΔP_{AB} puede ser relacionado a una energía cinética con

$$\Delta P_{AB} = \frac{1}{2} \zeta \rho u_A^2 \quad (2.29)$$

donde ζ es el coeficiente de pérdida de presión (adimensional) cuyo valor depende de las condiciones del flujo.

Mecanismos básicos de la ventilación. El flujo de aire a través de una abertura es causado por diferencias de presión. La ecuación de Bernoulli es generalmente usada para describir la relación entre la pérdida de presión y la velocidad del aire a través de la abertura (Boulard y Baille, 1995).

Asumiendo que el aire es incomprensible, la pérdida de presión ΔP a través de esta abertura está dada por la Ecuación (2.29) y se tiene:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \zeta \rho u^2 \quad (2.30)$$

donde ΔP y u son respectivamente el perfil vertical de la pérdida de presión y velocidad del aire a través de la abertura, ρ es la densidad del aire y ζ es el coeficiente de pérdida de presión.

Definiendo el coeficiente de descarga C_d de la abertura como

$$C_d = \zeta^{-0.5} \quad (2.31)$$

y si la pérdida de presión ΔP es determinado entre dos puntos a ambos lados de la ventana, la distribución de velocidad del aire u a través de una ventana puede deducirse de las Ecuaciones (2.30) y (2.31)

$$u = \frac{|\Delta P|}{\Delta P} C_d \left(\frac{2}{\rho} |\Delta P| \right)^{0.5} \quad (2.32)$$

donde el signo del cociente $|\Delta P| / \Delta P$ da la dirección del flujo de aire u a través de la abertura.

Todo el fenómeno de ventilación puede ser modelado usando la Ecuación (2.32). Diferencias de presión que produce el flujo de ventilación puede ser causado (i) tanto por una diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior que crea una diferencia de presión, comúnmente conocido efecto chimenea o (ii) por el viento que crea una diferencia de presión sobre el invernadero.

Efecto de la temperatura. Cuando se considera un campo de temperatura no uniforme en el dominio de interés caracterizado por una abertura entre ambas partes

del dominio, un flujo ocurrirá entre las partes calientes y frías del fluido aún en ausencia de un gradiente de presión debido a condiciones externas (viento). Este flujo es impulsado por el gradiente de densidad del fluido en el dominio, generado por fuerzas de flotación vertical, esto es, fuentes de momentum en la ecuación de momentum para el fluido. Flujo de fluido homogéneo no puede asumirse en este caso. No obstante, la variación espacial de la densidad del fluido puede enfocarse con la aproximación de Boussinesq. Entonces, considerando β el coeficiente de expansión térmica de un gas ideal,

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right) = \frac{1}{T_0} \quad (2.33)$$

con T_0 la temperatura de referencia en la base de la abertura ($z = 0$), la aproximación de Boussinesq conduce a

$$\rho(T(z)) = \rho(T_0) \left(1 - \frac{T(z) - T_0}{T_0} \right) \quad (2.34)$$

Por tanto, cuando se considera un perfil vertical de temperatura T_z a cada lado de la ventana, la diferencia de presión para cada posición vertical z en la ventana es determinado con la fórmula hidrostática:

$$\Delta P(z) = \Delta P_0 - \int_0^z \rho(T_0) \frac{T(z) - T_0}{T_0} g \, dz \quad (2.35)$$

donde ΔP_0 es la diferencia de presión en la base de la abertura ($z = 0$). La integración de esta ecuación es posible cuando el perfil de temperatura $T(z)$ es conocido.

- a) Caso de una abertura simple. Si se asume, con la finalidad de simplificar el problema, que el campo de temperatura interior y exterior es homogéneo, entonces:

$$\Delta P(z) = \Delta P_0 - \rho_0 g \frac{\Delta T}{T_0} z \quad (2.36)$$

donde ρ_0 es la densidad del fluido a la temperatura T_0 , y ΔT es la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. Entonces, se llega a la ecuación:

$$u = \frac{|\Delta P(z)|}{\Delta P(z)} C_d \left[\frac{2}{\rho} \left(\Delta P_0 - \rho g \frac{\Delta T}{T_0} z \right) \right]^{0.5} \quad (2.37)$$

La integración de $u(z)$ a lo largo de la superficie de entrada o salida del flujo da Q , la tasa de flujo de aire.

Dos importantes hipótesis concernientes al flujo de aire a través de aberturas son aceptadas:

- *Aproximación de primer orden.* En el caso de una sola abertura, la Ecuación (2.37) puede simplificarse si se asume una velocidad constante del aire, igual a u sobre toda la superficie de entrada e igual a $-u$ para la salida (Figura 2.1). Entonces, si h es la altura del centro geométrico de la superficie de entrada,

$$u = \frac{|\Delta P(z)|}{\Delta P(z)} C_d \left[\frac{2}{\rho} \left(\Delta P_0 - \rho g \frac{\Delta T}{T_0} h \right) \right]^{0.5} \quad (2.38)$$

Si h_0 es la altura del plano neutral correspondiente a la altura para el cual la presión interior y exterior son iguales, entonces $\Delta P = 0$ y $u = 0$.

La Ecuación (2.37) da para $u = 0$:

$$\Delta P_0 = \rho g \frac{\Delta T}{T_0} h_0 \quad (2.39)$$

sustituyendo la nueva expresión de ΔP_0 en la Ecuación (2.38) se obtiene

$$u = \frac{|\Delta P(z)|}{\Delta P(z)} C_d \left[\rho g \frac{\Delta T}{T_0} (h - h_0) \right]^{0.5} \quad (2.40)$$

Entonces, integrando u a lo largo de 0 a $H/2$ (superficie de entrada) o de $H/2$ a H (superficie de salida) se obtiene:

$$Q = \frac{A}{2} C_d \left(2 g \frac{\Delta T}{T_0} \frac{H}{4} \right)^{0.5} \quad (2.41)$$

donde A es el área de la abertura.

- *Aproximación de segundo orden.* Integrando la velocidad del flujo de aire $u(z)$ dado por la Ecuación (2.37) sobre la superficie entrante (parte inferior de la abertura) o la superficie saliente (parte superior de la abertura)

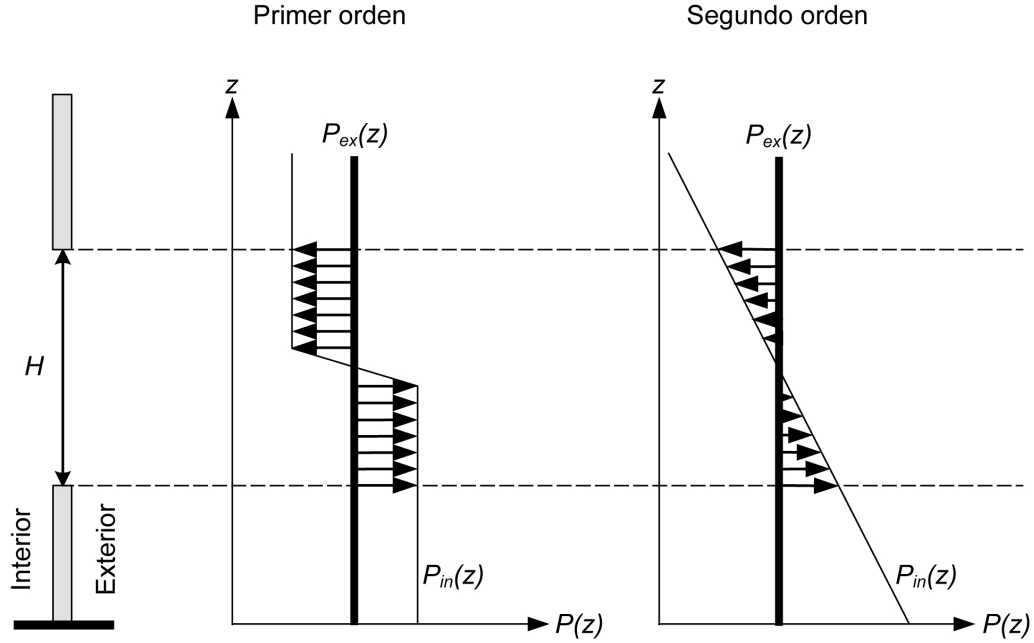


Figura 2.1: Esquema de la distribución de presión interior $P_{in}(z)$ (línea delgada), presión exterior $P_{ex}(z)$ (línea gruesa) y velocidad del aire (vectores) en una abertura de altura H .

se obtiene:

$$Q = \frac{w H}{3} C_d \left(2 g \frac{\Delta T}{T_0} \frac{H}{2} \right)^{0.5} \quad (2.42)$$

donde w es el ancho de las ventanas y H es la altura vertical de la abertura.

- b) Caso de dos aberturas. Cuando se considera dos aberturas con áreas A_{bot} (uno inferior) y A_{top} (uno superior) separados por una altura vertical h' y un idéntico coeficiente de descarga C_d , la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad con la hipótesis de enfoque tipo segundo orden ayuda a determinar la tasa de ventilación Q intercambiado entre A_{bot} y A_{top} inducido por una diferencia de temperatura ΔT entre el interior y el exterior:

$$Q = \frac{A_{bot} A_{top}}{(A_{bot}^2 + A_{top}^2)^{0.5}} C_d \left(2 g \frac{\Delta T}{T} h' \right)^{0.5} \quad (2.43)$$

Efecto del viento. La acción del viento sobre estructuras como los invernaderos resulta en una distribución de presión alrededor de estos obstáculos. Efectos del viento son usualmente separados en dos componentes: un componente medio ligado a la velocidad promedio del viento a través del coeficiente de viento promedio $\bar{C}$:

$$\Delta \bar{P} = \frac{1}{2} \rho \bar{C} u^2 \quad (2.44)$$

y uno turbulento, caracterizado por C' que expresa la característica fluctuante de la presión del viento:

$$\Delta P' = \frac{1}{2} \rho C' u^2 \quad (2.45)$$

Como las mediciones no pueden determinar la contribución relativa de los componentes medio y turbulento, muchos autores (Roy *et al.*, 2002) asumen un coeficiente total de efecto de viento C_w que indistintamente integra ambas contribuciones:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho C u^2 \quad (2.46)$$

Sustituyendo la expresión de la pérdida de presión dada en la relación (2.46) en (2.32) e integrando el flujo sobre el área de entrada o salida ($A/2$), la siguiente relación simplificada para el flujo de ventilación puede ser deducido (Boulard y Baille, 1995; Papadakis *et al.*, 1996):

$$Q_w = \frac{A}{2} C_d C_w^{0.5} u \quad (2.47)$$

Efecto combinado del viento y temperatura. La ventilación en invernaderos es usualmente un resultado combinado de viento y fuerzas de flotación. Muchos autores asumen un campo de presión resultante a partir de la suma de un campo de presión debido tanto al viento como al efecto térmico, *i.e.* $\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_{th}$ y esta hipótesis permite la suma vectorial de los flujos individuales de viento y temperatura de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Q = (Q_w^2 + Q_{th}^2)^{0.5} \quad (2.48)$$

Boulard y Baille (1995) proponen la siguiente relación para un invernadero equipado únicamente con ventanas cenitales o laterales, sumando las diferencias de presión individuales:

$$Q = \frac{A}{2} C_d \left(2g \frac{\Delta T}{T_0} \frac{H}{4} + C_w u^2 \right)^{0.5} \quad (2.49)$$

Para un invernadero equipado con ventanas cenitales (área A_r) y ventanas laterales (área A_s), Kittas *et al.* (1997) derivaron la siguiente ecuación para calcular el efecto combinado:

$$Q = C_d \left\{ \left(2g \frac{\Delta T}{T_0} h' \right) \left[\frac{(A_r A_s)^2}{A_r^2 + A_s^2} \right] + \left[\frac{A_r + A_s}{2} \right]^2 C_w u^2 \right\}^{0.5} \quad (2.50)$$

Generalmente la ventilación originada por la temperatura es únicamente significativo a bajas velocidades, esto es a velocidades de viento menores de 1 [m s⁻¹] para invernaderos equipados únicamente con ventanas cenitales o menores de aproximadamente 2 [m s⁻¹] según otros autores (Bot, 1983; Papadakis *et al.*, 1996). Para invernaderos con ventanas cenitales y laterales, Kittas *et al.* (1997) consideran que la ventilación por temperatura es significativa únicamente si $u/\Delta T^{0.5} < 1$.

2.2. COMPUTACIÓN EVOLUTIVA

El paradigma de la Computación Evolutiva es el estudio de sistemas computacionales los cuales usan ideas y se inspiran en la evolución y adaptación natural (Yao, 2003). Su meta es comprender tales sistemas computacionales y desarrollar uno mas robusto y eficiente para la solución de problemas complejos del mundo real. Los problemas a tratar con tales sistemas computacionales son usualmente altamente no lineales y contienen datos inexactos y con ruido.

Muchos enfoques de la computación evolutiva adquieren sus ideas e inspiración de la evolución molecular, genética de poblaciones, inmunología, etc. Alguna de la terminología usado en computación evolutiva se tomó prestado de estos campos para reflejar sus conexiones, tales como algoritmo genético, genotipo, fenotipo, especie, etc. Aunque la investigación en computación evolutiva puede ayudar a entender

mejor algunos fenómenos biológicos, su principal objetivo no es construir modelos biológicos plausibles. El propósito primario es el estudio y desarrollo de robustos y eficientes sistemas computacionales para resolver problemas complejos del mundo real.

La computación evolutiva engloba varias ramas principales, estos son: estrategias evolutivas, programación evolutiva, algoritmos genéticos y programación genética, debido mayormente a razones históricas. A nivel filosófico, difieren entre ellos principalmente en el nivel al que simulan la evolución. A un nivel algorítmico, difieren entre ellos principalmente en su representación de soluciones potenciales y sus operadores usados para modificar las soluciones.

Las Estrategias Evolutivas fueron primero propuesto por Rechenberg y Schwefel en 1965 como una técnica de optimización numérica. La estrategia de evolución original no utilizaba poblaciones. Una población fue introducida en las estrategias evolutivas posteriormente (Schwefel, 1995).

La Programación Evolutiva fue propuesta primero por Fogel y colaboradores a mediados de 1960's como un método para alcanzar inteligencia artificial (Fogel *et al.*, 1966). Varios ejemplos de evolución de máquinas de estado finito fueron mostrados por los autores. Desde finales de 1980's, programación evolutiva ha sido aplicada a varios problemas de optimización combinatoria y numérica.

El esquema actual de los algoritmos genéticos fue propuesto primero por Holland en 1975 aunque algunas de las ideas aparecieron a principios de 1957 en el contexto de la simulación de sistemas genéticos en los trabajos de Fraser (Yao, 2003). Algoritmos genéticos fueron primero propuestos como algoritmos de búsqueda adaptable, aunque han sido usados principalmente como un algoritmo de optimización global tanto para problemas combinatorios como numéricos. Estos son probablemente la rama más ampliamente conocido de la computación evolutiva.

Una sub-rama especial de los algoritmos genéticos es la programación genética que puede considerarse como una aplicación de algoritmos genéticos para evolucionar.

nar cromosomas estructurados en árboles. Históricamente, estos árboles representan programas en lenguaje LISP (LISt Processing). El término de programación genética fue primero usado por Koza (Koza, 1989; Koza, 1990).

En años recientes, el término general de algoritmos evolutivos ha sido usado por más y más investigadores para incluir los tres algoritmos principales, esto es, estrategias evolutivas, programación evolutiva y algoritmos genéticos, puesto que usan más o menos el mismo esquema computacional (Yao, 2003).

Todos los algoritmos evolutivos poseen dos rasgos distintivos que los distinguen a si mismos de otros algoritmos de búsqueda. Primero, todos ellos están basados en poblaciones de soluciones. Segundo, existe comunicaciones e intercambio de información entre individuos de una población. Tales comunicaciones e intercambio de información son el resultado de selección y/o recombinación en los algoritmos evolutivos. La estructura general de un algoritmo evolutivo puede resumirse en la Figura 2.2, donde el operador de búsqueda también es llamado operador genético para los algoritmos genéticos. Estos son usados para generar descendencia (nuevos individuos) a partir de padres (individuos existentes). Diferentes representaciones de individuos y diferentes esquemas para implementar la evaluación de aptitud, selección y operadores de búsqueda definen diferentes algoritmos.

```
1 Asignar i=0;
2 Generar la población inicial P(i) de manera aleatoria;
3 REPETIR
    (a) Evaluar la aptitud de cada individuo de P(i);
    (b) Seleccionar los padres a partir de P(i) basado en su aptitud;
    (c) Aplicar operadores de búsqueda a los padres y producir
        la generación P(i+1);
4 HASTA la población converge o el tiempo máximo es alcanzado
```

Figura 2.2: Estructura general de un algoritmo evolutivo.

2.2.1. Estrategias evolutivas

Para las estrategias evolutivas (EE), la representación de los individuos es frecuentemente muy cercana a la representación natural del problema (Bäck, 1996). Esta no enfatiza la representación genética de los individuos. Por ejemplo, un individuo es representado como un vector de números reales antes que una cadena binaria, para problemas de optimización. Las EE usualmente usan un esquema de selección determinista, mutación Gaussiana, y una recombinación discreta o intermedia. El término cruzamiento es usado pocas veces en el contexto de estrategia evolutiva debido a que estrategia evolutiva no simula la evolución al nivel genético.

Existen dos principales esquemas de selección determinista en EE, esto es, $(\lambda + \mu)$ y (λ, μ) donde μ es el tamaño de la población (que es el mismo como el número de progenitores) y λ es el número de descendientes generados a partir de todos los μ progenitores. En la EE $(\lambda + \mu)$, λ descendientes pueden ser generados a partir de μ progenitores. Los μ individuos más aptos de $\lambda + \mu$ candidatos serán seleccionados para formar la siguiente generación. En la EE (λ, μ) , los μ individuos más aptos de λ descendientes únicamente serán seleccionados para formar la siguiente generación. Como un resultado, se requiere que $\lambda \geq \mu$.

El operador de mutación en EE es a menudo implementado por adición de un número aleatorio Gaussiano a un progenitor. Asumiendo que $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ es un progenitor (individuo), entonces un descendiente será generado por mutación como sigue:

$$x'_i = x_i + N_i(0, \sigma_i) \quad (2.51)$$

donde $N_i(0, \sigma_i)$ es un número aleatorio distribuido normalmente con media 0 y desviación estándar σ_i . Los n números aleatorios son generados de forma independiente.

Un importante parámetro en la mutación Gaussiana es la desviación estándar, σ_i . Su selección es muy importante en la determinación del desempeño de la estrategia evolutiva. Desafortunadamente, su valor óptimo es dependiente del problema así como también dependiente de su dimensión. Schwefel (1981) propuso incluir σ_i 's

como parte de un individuo a fin de que éste pueda evolucionar automáticamente. Esto en ocasiones es llamado auto-adaptación en EE. Esta es uno de las mayores diferencias entre EE y algoritmos genéticos. En muchas implementaciones, σ_i 's es mutado primero, y entonces x_i es mutado usando el nuevo σ_i' .

Mutar diferentes componentes de un vector independientemente puede no ser apropiado para algunos problemas debido a que esos componentes pueden no ser independientes del todo. Para abordar este problema, las covarianzas ha sido introducido como otra parte adicional de un individuo. La estrategia de evolución mediante adaptación de matriz de covarianza (covariance matrix adaptation evolution strategy, CMA-ES) es un algoritmo capaz de obtener muy buenos resultados en problemas de optimización continua (Hansen, 2006).

Recombinación en EE toma dos formas principales, esto es, recombinaciones discreta e intermedia. Recombinación discreta mezcla componentes de dos vectores progenitores. Por ejemplo, dados dos progenitores $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ y $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$. El descendiente $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ y $\mathbf{y}' = (y'_1, y'_2, \dots, y'_n)$ puede ser generado como sigue:

$$x' = \begin{cases} x_i & \text{con probabilidad } p_{recombinacion} \\ y_i & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (2.52)$$

donde $\mathbf{y}'$ será el complemento de $\mathbf{x}'$.

Recombinación intermedia se basa usualmente en algún tipo de promediación. Por ejemplo, dado dos progenitores $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ y $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$. El descendiente $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ y $\mathbf{y}' = (y'_1, y'_2, \dots, y'_n)$ puede ser generado como sigue:

$$x' = x_i + \alpha(y_i - x_i) \quad (2.53)$$

donde α es un parámetro de peso en (0,1). Este parámetro tradicionalmente se fija a 0.5. Este puede también ser generado aleatoriamente. $\mathbf{x}'$ puede ser generado similarmente.

2.2.2. Evolución diferencial

Evolución Diferencial (ED) es una técnica de optimización reciente en la familia de computación evolutiva. Fue propuesto como una variante de algoritmos evolutivos para lograr los objetivos de robustez en optimización y rápida convergencia para un problema dado (Storn y Price, 1995). ED difiere de otros algoritmos evolutivos en las fases de mutación y recombinación. A diferencia de algunas técnicas meta-heurísticas tales como algoritmos genéticos y estrategias evolutivas, donde la perturbación ocurre en proporción a una cantidad aleatoria, ED usa diferencias ponderadas entre vectores solución para perturbar la población. Los algoritmos ED poseen muy buenas capacidades de exploración y explotación por sus operadores evolutivos y han mostrado que son significativamente rápidos y robustos para optimización numérica (Storn y Price, 1997).

En ED, las variables se representan mediante números reales. La población inicial se genera aleatoriamente verificando que cada variable se genere dentro de los límites requeridos. Posteriormente, se selecciona aleatoriamente un individuo para reemplazo y se seleccionan 3 individuos como padres. Uno de los 3 padres seleccionados es el “padre principal”. Con alguna probabilidad, se cambia cada variable del padre principal, de tal forma que al menos una de sus variables sea modificada.

El cambio se efectúa agregando al valor de la variable una razón de la diferencia entre los dos valores de esta variable en los otros dos padres. En esencia, el vector del padre principal se perturba con el vector de los otros dos padres. Este proceso representa el equivalente de la crucea en ED. Si el valor resultante es mejor que el elegido para reemplazo, entonces lo reemplaza. De lo contrario, se retiene el vector elegido para reemplazo.

El algoritmo “ED clásico” (Price *et al.*, 2005; Storn, 2008) puede resumirse como sigue:

a. La población

$$\begin{aligned} P_{\mathbf{x},g} &= (\mathbf{x}_{i,g}), \quad i = 0, 1, \dots, Np - 1; \quad g = 0, 1, \dots, g_{\text{máx}}, \\ \mathbf{x}_{i,g} &= (x_{j,i,g}), \quad j = 0, 1, \dots, D - 1. \end{aligned} \quad (2.54)$$

donde Np denota el número de vectores o individuos en la población, g define el contador de generación, y D la dimensionalidad, esto es, el número de variables.

b. La inicialización de la población vía

$$x_{j,i,0} = \text{rand}_j[0, 1] (b_{j,U} - b_{j,L}) + b_{j,L}. \quad (2.55)$$

Los vectores de inicialización D -dimensional, $\mathbf{b}_L$ y $\mathbf{b}_U$ indican los límites superior e inferior del vector de parámetros $\mathbf{x}_{i,j}$. El generador de números aleatorios, $\text{rand}_j[0, 1]$, devuelve número aleatorio uniformemente distribuido en el rango $[0, 1)$. El subíndice j indica que un nuevo valor aleatorio es generado para cada parámetro.

c. Una vez inicializado, ED muta y recombina la población para producir una población de Np vectores de prueba. La perturbación de un vector base $\mathbf{y}_{i,g}$ mediante el uso de mutación basado en diferencia vectorial

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{y}_{i,g} + F (\mathbf{x}_{r1,g} - \mathbf{x}_{r2,g}) \quad (2.56)$$

para generar un vector perturbado $\mathbf{v}_{i,g}$. Los índices en la diferencia de vectores, $r1$ y $r2$, son elegidos aleatoriamente una vez por vector base. Estableciendo $\mathbf{y}_{i,g} = \mathbf{x}_{r0,g}$ se define lo que a menudo se denomina “ED clásico” donde el vector base es también un vector población elegido aleatoriamente. Los índices aleatorios $r0$, $r1$, y $r2$ deberán ser mutuamente excluyentes.

d. Mejoramiento de la diversidad. La variante clásica de mejoramiento de la diversidad es el cruzamiento que mezcla parámetros del vector perturbado $\mathbf{v}_{i,g}$ y

el llamado vector objetivo $\mathbf{x}_{i,g}$ para generar el vector de prueba $\mathbf{u}_{i,g}$. La forma más común de cruzamiento es el uniforme y se define como

$$\mathbf{u}_{i,g} = u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{si } (\text{rand}_j[0, 1] \leq Cr \text{ o } j = j_{\text{rand}}) \\ x_{j,i,g} & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (2.57)$$

Para prevenir el caso $\mathbf{u}_{i,g} = \mathbf{x}_{i,g}$ al menos un componente es tomado del vector perturbado $\mathbf{v}_{i,g}$, aleatoriamente es elegido el parámetro de prueba con índice $j = j_{\text{rand}}$.

La probabilidad de cruzamiento, $Cr \in [0, 1]$, es un valor definido por el usuario que controla la fracción de valores de los parámetros que son copiados desde el perturbado.

- e. Selección. ED usa la simple selección del sobreviviente uno-a-uno donde el vector de prueba $\mathbf{u}_{i,g}$ compite contra el vector objetivo $\mathbf{x}_{i,g}$. El vector con más bajo valor de la función objetivo sobrevive pasando a formar parte de la siguiente generación $g + 1$.

$$\mathbf{x}_{i,g+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,g} & \text{si } f(\mathbf{u}_{i,g}) \leq f(\mathbf{x}_{i,g}) \\ \mathbf{x}_{i,g} & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (2.58)$$

Varios algoritmos ED pueden ser identificados siguiendo tres criterios: el tipo de mutación, el número de vectores diferencia y el tipo de cruzamiento (López, 2005). Existen en general tres tipos de mutación, que dependen en como el vector a ser mutado es muestreado: selección individual aleatoria, la mejor solución hasta el momento o el vector objetivo en la población. En general el número de vectores diferencia pueden ser más de dos, pero en la práctica uno y dos son usados únicamente. Existen dos tipos de operadores de cruzamiento: binomial y exponencial. Los algoritmos ED comúnmente son clasificados usando la notación definida por “DE/x/y/z”, donde “x” denota el vector base, “y” denota el número de diferencia de vectores usado, y “z” representa el método de cruza. Por ejemplo, “DE/rand/1/bin” es la

notación para el ED descrito arriba y conocido como “ED clásico” y que es el más frecuentemente usado en la práctica (Price *et al.*, 2005). En el Cuadro 2.1 se resumen los algoritmos de evolución diferencial más ampliamente utilizados.

Cuadro 2.1: Algoritmos de evolución diferencial más ampliamente utilizados (López, 2005).

Estrategia	Operador de mutación	Cruzamiento
DE/rand/1/exp	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{r1} + F(\mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3})$	Exponencial
DE/best/1/exp	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{best} + F(\mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3})$	Exponencial
DE/target-to-best/1/exp	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i + F(\mathbf{x}_{best} + \mathbf{x}_{r1} - \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{r2})$	Exponencial
DE/best/2/exp	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{best} + F(\mathbf{x}_{r1} + \mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3} - \mathbf{x}_{r4})$	Exponencial
DE/rand/2/exp	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{r5} + F(\mathbf{x}_{r1} + \mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3} - \mathbf{x}_{r4})$	Exponencial
DE/target-to-rand/1/exp	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i + K(\mathbf{x}_{r3} + \mathbf{x}_i) + F(\mathbf{x}_{r1} - \mathbf{x}_{r2})$	Exponencial
DE/rand/1/bin	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{r1} + F(\mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3})$	Binomial
DE/best/1/bin	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{best} + F(\mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3})$	Binomial
DE/target-to-best/1/bin	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i + F(\mathbf{x}_{best} + \mathbf{x}_{r1} - \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{r2})$	Binomial
DE/best/2/bin	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{best} + F(\mathbf{x}_{r1} + \mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3} - \mathbf{x}_{r4})$	Binomial
DE/rand/2/bin	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{r5} + F(\mathbf{x}_{r1} + \mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3} - \mathbf{x}_{r4})$	Binomial
DE/target-to-rand/1/bin	$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i + K(\mathbf{x}_{r3} + \mathbf{x}_i) + F(\mathbf{x}_{r1} - \mathbf{x}_{r2})$	Binomial
DE/best/1/bin(d)	$F_j = F + 0.001 + (\text{rand}_j(0, 1) - 0.5)$ $\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{best} + F(\mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3}) \quad d = 0.001$	Binomial
DE/rand/either-or	$\mathbf{v}_i = \begin{cases} \mathbf{x}_{r1} + F(\mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3}) & \text{if } \text{rand}_i(0, 1) < Pf \\ \mathbf{x}_{r1} + 0.5(F + 1)(\mathbf{x}_{r2} + \mathbf{x}_{r3} - 2\mathbf{x}_{r1}) & \text{else} \end{cases}$	

2.3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Estimación de parámetros o calibración de un modelo es el proceso de alterar los parámetros para obtener un mejor ajuste entre datos simulados y medidos. De acuerdo con Tap (2000), los parámetros seleccionados para calibración son aquellos, (i) que son inciertos, (ii) que más afectan el comportamiento del modelo (sensibilidad) y (iii) que afectan el comportamiento del modelo de manera que es necesario obtener un mejor ajuste entre datos simulados y medidos.

2.3.1. Selección de parámetros a estimar

Los parámetros a calibrar pueden ser seleccionados de una manera formal, o por razonamiento, esto es, examinando el rol de los parámetros en el modelo. Formal-

mente el grado en que cada parámetro influencia el comportamiento del proceso y en que forma éste afecta el comportamiento del proceso, puede ser examinado usando un análisis de sensibilidad. La evolución en el tiempo del modelo de sensibilidad $S(t)$ de todos los estados con respecto a todos los parámetros es definido como:

$$S(t) \equiv \frac{\partial x(t)}{\partial p} \quad (2.59)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es la evolución en el tiempo del vector de estado, $p \in \mathbb{R}^m$ es el vector de parámetros y t denota el tiempo. Cada elemento de la matriz de sensibilidad $S(t)$ representa la evolución en el tiempo de la derivada de un estado a un parámetro. Una aproximación para la evolución en el tiempo de $S(t)$:

$$\frac{dS}{dt} \approx \frac{\partial f}{\partial x} S + \frac{\partial f}{\partial p} \quad (2.60)$$

con

$$S(t_0) = 0 \quad (2.61)$$

donde el lado derecho de la ecuación de salida es definido por f :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, p) \quad (2.62)$$

donde u son las variables de control que no dependen de p . En ocasiones es más conveniente examinar las sensibilidades en las salidas, antes que en los estados. Si las salidas son calculadas a partir de los estados por

$$y = g(x, u, p) \quad (2.63)$$

entonces las sensibilidades en las salidas son ligados algebraicamente a las sensibilidades en los estados por

$$S_y = \frac{\partial y}{\partial p} = \frac{\partial g}{\partial p} S + \frac{\partial g}{\partial p} \quad (2.64)$$

Para poder hacer una buena comparación entre diferentes sensibilidades la sensibilidad relativa S_{rel} es calculado por:

$$S_{rel} = S \frac{p}{y} = \frac{\partial y}{\partial p} \frac{p}{y} \quad (2.65)$$

Una desventaja es que este puede presentar problemas numéricos cuando y es muy pequeño o igual a cero.

La ordenación jerárquica de los parámetros se realiza en base a

$$I = \int_{t_0}^{t_f} |S_{rel}| dt \quad (2.66)$$

donde t_0 es el tiempo inicial y t_f es el tiempo final.

Para hacer la selección final también el curso en el tiempo de las sensibilidades y conocimiento acerca de la certidumbre del valor nominal del parámetro es usado.

2.3.2. Estimación y validación

Generalmente en los estudios de calibración que utilizan un algoritmo de optimización como mínimos cuadrados utilizan una función objetivo como la función J igual a la suma ponderada del cuadrado de los errores:

$$J = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_h (\hat{y}_h(t_i, p) - y_{hj}(t_i))^2 \quad (2.67)$$

$$p^* = \arg \min J(p) \quad (2.68)$$

donde w_h es el peso relativo de cada salida, $\hat{y}_h(t_i, p)$ es la salida simulada y_h en el tiempo t_i y $y_{hj}(t_i)$ en la j -ésima repetición de la medición y_h en el tiempo t_i , L es el número de salidas, M es el número de observaciones, y N es el número de repeticiones en cada instante de observación. p es el conjunto de parámetros de calibración y p^* son los parámetros que minimizan $J(p)$. Los diferentes pesos w_h determinan la importancia relativa de una salida con respecto a cada uno de los otras.

La calidad de la parametrización de un modelo se cuantifica por varios índices estadísticos y se juzga por predicciones del modelo para otras condiciones experimentales. Uno de los índices estadísticos más comúnmente usados es la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE). Para un conjunto de datos con M puntos medidos,

$RMSE$ es definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M w_i (P_i - O_i)^2}{M}} \quad (2.69)$$

donde w_i es el factor de peso a menudo establecido igual a 1.0, P_i y O_i son los puntos predichos por el modelo y mediciones experimentales, respectivamente. Los M puntos de datos observados pueden provenir de un tratamiento o múltiples tratamientos. El $RMSE$ refleja la magnitud de la diferencia media entre resultados experimentales y simulados.

Otro índice estadístico frecuentemente utilizado es el error absoluto medio (MAE), dado por:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^M |O_i - P_i|}{M} \quad (2.70)$$

que describe la diferencia entre las simulaciones del modelo y observaciones en las unidades de la variable.

Otro enfoque comúnmente usado es realizar una análisis de regresión entre las mediciones y las salidas predichas por el modelo. El coeficiente de determinación (r^2) que describe la proporción de la varianza total en los datos observados que puede ser explicado por el modelo, es entonces calculado como:

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^M (O_i - O_{pro})(P_i - P_{pro}) \right]^2}{\sum_{i=1}^M (O_i - O_{pro})^2 \sum_{i=1}^M (P_i - P_{pro})^2} \quad (2.71)$$

donde le subíndice *pro* indica valor promedio. El rango de valores de r^2 va de 0.0 a 1.0, un valor de $r^2 = 1.0$ indica una correlación perfecta entre resultados experimentales y simulaciones y $r^2 = 0.0$ significa no correlación entre los dos resultados. El coeficiente de determinación es demasiado sensible a valores extremos e insensible a diferencias aditivas y proporcionales entre predicciones del modelo y observaciones.

Otros método para evaluación de modelos son el coeficiente de eficiencia E (Legates y McCabe, 1999; Nash y Sutcliffe, 1970) y el índice de concordancia d (Legates y McCabe, 1999; Willmott *et al.*, 1985). El coeficiente de eficiencia E ha sido ampliamente utilizado para evaluar el desempeño de modelos, se define con rangos que

van desde menos infinito a 1.0, con valores más grandes indicando mejor correspondencia, como

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^M (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^M (O_i - O_{pro})^2} \quad (2.72)$$

El coeficiente de eficiencia es una medida de la desviación entre predicciones del modelo y mediciones en relación a la dispersión de los datos observados. $E = 1.0$ indica una perfecta concordancia entre resultados observados y de simulaciones. Debido a la diferencia de cuadrados E es demasiado sensible a valores extremos, como lo es r^2 .

Willmott (1981) buscando superar la insensibilidad de las medidas basadas en correlación a diferencias en las medias y varianzas observados y simulados con el modelo desarrolló el índice de concordancia d , dado por

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^M (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^M (|P_i - O_{pro}| + |O_i - O_{pro}|)^2} \quad (2.73)$$

El índice de concordancia es similar al coeficiente de eficiencia pero más sensitivo a desviaciones sistemáticas del modelo. El índice de concordancia varía de 0.0 a 1.0, con valores altos indicando un mejor concordancia entre el modelo y las observaciones, similar a la interpretación del coeficiente de determinación r^2 .

Capítulo 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL INVERNADERO

En la presente investigación se utilizó un invernadero ubicado en el Laboratorio de Ingeniería de Riego “Tlapeaxco” del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo. El laboratorio “Tlapeaxco” está situado a $19^{\circ} 29'$ latitud norte y $98^{\circ} 54'$ longitud oeste, a una altitud de 2250 msnm. El clima del lugar es templado semiseco, con una temperatura media anual de 16°C , con heladas poco frecuentes y una precipitación pluvial media anual de 686 mm. Sus vientos dominantes tienen dirección sur.

El invernadero utilizado es de tipo cenital con dimensiones 57 m de largo por 45 m de ancho. Se compone de seis naves de 7.5×57 m, una altura de 5.25 m, cubre un área de piso de 2565 m^2 y un tiene un volumen de 11760 m^3 . La cubierta es de polietileno de una capa calibre 700 ultravioleta con una vida útil recomendada de 2 años. Cuenta con ventanas laterales y cenitales, protegidas con malla antiáfidos de 45×25 hilos, estas ventanas se cierran por medio de malacates y cubren un superficie de 495 m^2 y representa el 19 % de la superficie de piso. La temperatura se controla con ventilación natural en los meses cálidos, y en los meses fríos, con un sistema de calefacción compuesto de seis calentadores de gas que se activa mediante un termostato (Figura 3.1).

La textura del suelo es franco arcillosa, con una densidad aparente de 1.25 y 1.36 gr cm^{-3} a la profundidad de 10 y 30 cm respectivamente, la densidad real de 2.35 a los 10 cm y 2.39 gr cm^{-3} a los 30 cm de profundidad, el porcentaje de humedad a capacidad de campo de 29.6 % y punto de marchitez permanente de 16.5 % (López, 2008).



Figura 3.1: Invernadero tipo cenital con ventilación natural donde se realizaron las mediciones.

En el periodo durante el cual se realizaron las mediciones de las variables meteorológicas, el invernadero estaba siendo utilizado por un cultivo de tomate que se encontraba en su etapa final, con un fuerte ataque de mosquita blanca.

3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

Para medir las variables de clima en el interior del invernadero se instaló una estación meteorológica marca HOBO en el centro del invernadero. Las lecturas de los sensores se promediaron y almacenaron en el datalogger cada minuto. Las variables que se midieron fueron la radiación solar, humedad relativa y temperatura del aire a 2 m; radiación solar y temperatura del aire a 30 cm del suelo; temperatura del suelo a 5 y 40 cm de profundidad; temperatura de la cubierta en las caras este y oeste del invernadero. El periodo de registro de datos fue de la segunda quincena de febrero a la primera quincena de marzo de 2007.

Las variables del clima exterior se midieron a 2 m de altura con una estación meteorológica marca HOBO que ya se encontraba instalada a unos metros del invernadero. Las variables que se midieron fueron la radiación solar, humedad relativa, temperatura del aire, velocidad y dirección del viento. Las lecturas de los sensores se promediaron y almacenaron en el datalogger cada minuto.

La apertura y cierre de ventanas así como de la operación del sistema de calefa-

ción fueron obtenidos de las bitácoras de operación del invernadero.

3.3. MODELO PARA SIMULACIÓN DEL CLIMA DEL INVERNADERO

3.3.1. Supuestos de modelado

En el desarrollo del modelo se hacen las siguientes supuestos:

- Condiciones de contorno: temperatura del aire exterior, T_e [K]; la humedad absoluta del aire exterior, C_{e-H_2O} [kg(H₂O) m⁻³]; la velocidad del viento en el exterior, v_e [m s⁻¹]; la temperatura de la bóveda celeste, T_{sk} [K]; la radiación global en el exterior, I_e [W m²]; la temperatura del subsuelo, T_{sub} [K]; y el índice de área foliar, LAI [m²(hoja) m⁻²(suelo)].
- Entradas de control del sistema son la posición de las ventanas laterales U_{ulat} [m²] y cenitales U_{vcen} [m²].
- Se considera los flujos únicamente en la dirección vertical desde la cubierta hacia el suelo.
- Se considera el principio de distribución homogénea de las variables.
- En modelos de temperatura se consideran los siguientes procesos: absorción de radiación solar, convección, conducción, intercambio de calor con el exterior por ventilación y pérdidas por infiltración, absorción de radiación térmica, calor latente por evaporación y por transpiración del cultivo.
- El modelo de humedad del aire considera el proceso de intercambio de vapor de agua con el exterior por ventilación y pérdidas por infiltración, la transpiración del cultivo, los procesos de condensación en la cubierta y evaporación en la superficies del suelo.
- Se considera que el aire es inerte a la radiación. En los balances de radiación no se consideran los efectos de la reflexión y los factores de forma se consideran como parámetros empíricos a estimar.

- Las capacidades caloríficas de las distintas capas de suelo no se conocen y no ha sido posible medirlas, por lo que se han considerado como parámetros a estimar.

3.3.2. Estados, entradas de control y entradas externas

El modelo del invernadero está escrito en la forma de espacios de estado

$$\dot{x} = f(t, x, u, w) \quad (3.1)$$

donde t es el tiempo, x son los estados, u son las entradas de control, w son las entradas externas y f es una función no lineal. Esta función se integra utilizando el algoritmo de integración Runge–Kutta de cuarto orden con tamaño de paso variable para obtener los estados.

El modelo desallorado en este trabajo se basa en los modelos descritos por de Zwart (1996), Rodríguez (2002) y van Ooteghem (2007). A partir de los modelos desarrollados por estos autores, se desarrollo un nuevo modelo que incorpora las características particulares de los invernaderos y del clima predominantes en la zona central de México.

Las ecuaciones de estado se han formado sobre la base de las leyes de conservación de la entalpía y la materia. El comportamiento dinámico de los estados se describe utilizando ecuaciones diferenciales de primer orden no lineales, que coinciden con la descripción en espacios de estados del sistema. Las convenciones de notación usados para la descripción del modelo se dan en el Cuadro 3.1.

La descripción de los estados x , las entradas de control u y las entradas externas w se dan en el Cuadro 3.2. Las variables de estados x , las entradas externas w y las entradas de control u se muestran en la Figura 3.2. En esta figura, los marcos de las variables de estado x están en negro, las entradas externas w están en líneas discontinuas y las entradas de control u están en líneas discontinuas-punteadas.

A continuación se describen los procesos que tienen lugar en el invernadero y que están incluidos en el modelo.

Cuadro 3.1: Convención de la notación utilizada en la descripción del modelo de simulación.

Símbolo	Descripción	Unidad	Símbolo	Descripción	Unidad
Variables					
Φ_m	Tasa de flujo de masa	kg s^{-1}	T	Temperatura	K
Φ	Tasa de flujo de volumen	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	V	Volumen	m^3
A	Área de superficie	m^2	$\rho c_p V$	Capacidad de calor	J K^{-1}
Q	Intercambio de calor	W			
Subíndices					
a	Interior		Is	Radiación solar	
cu	Cultivo		Il	Radiación térmica	
H_2O	Agua		cb	Superficie de cubierta	
ing	Ingresa al sistema		$s1, s2, s3, s4$	Capas de suelo	
e	Exterior		sub	Subsuelo	
sal	Abandona el sistema		sk	Cielo	

Cuadro 3.2: Estados, entradas de control y entradas externas del modelo de simulación.

Estados x		
C_{a-H_2O}	Concentración de agua en el interior	$\text{kg(H}_2\text{O)} \text{ m}^{-3}$
T_a	Temperatura del aire interior	K
T_{cb}	Temperatura de superficie interior de cubierta	K
$T_{s1}, T_{s2}, T_{s3}, T_{s4}$	Temperatura de capas de suelo	K
Entradas de control u		
U_{vlat}, U_{vcen}	Apertura de ventana lateral y cenital	m^2
Entradas externas w		
I_e	Radiación de onda corta exterior	W m^{-2}
v_e	Velocidad del viento exterior	m s^{-1}
T_e	Temperatura del aire exterior	K
T_{sk}	Temperatura de la bóveda celeste	K
T_{sub}	Temperatura de subsuelo	K
C_{e-H_2O}	Concentración de agua en el exterior	$\text{kg(H}_2\text{O)} \text{ m}^{-3}$

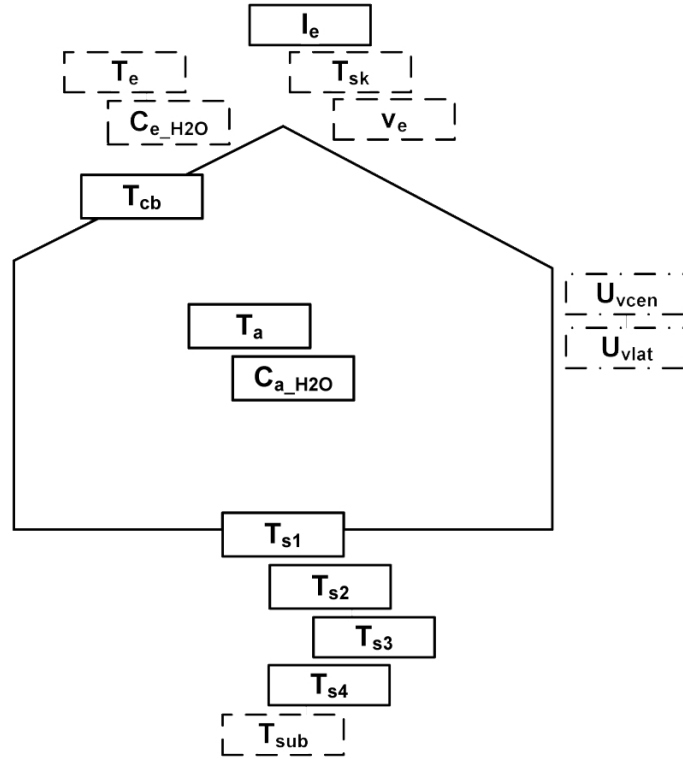


Figura 3.2: Estados x (línea continua), entradas externas w (línea punteada) y entradas de control u (línea-punto) en el modelo de simulación del invernadero.

3.3.3. Modelado de la humedad del aire

La ecuación diferencial para la concentración de vapor de agua C_{a_H2O} [kg(H₂O) m⁻³] en el aire interior es

$$\frac{dC_{a_H2O}}{dt} = \frac{\Phi_{m(cu-a)} - \Phi_{m(cb-a)} - \Phi_{m(a-e)}}{V_a} \quad (3.2)$$

donde V_a [m³] es el volumen que ocupa el aire del invernadero, $\Phi_{m(cu-a)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] es la transpiración del cultivo, $\Phi_{m(cb-a)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] es la condensación en la superficie interior de la cubierta y $\Phi_{m(a-e)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] es el flujo de vapor por ventilación e infiltración.

3.3.3.1. Transpiración del cultivo

El flujo de masa de vapor de agua $\Phi_{m(cu-a)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] del cultivo al aire interior debido a la transpiración se modela con la ecuación de Penman-Monteith

modificado por Stanghellini:

$$\Phi_{m(cu-a)} = A_s \left[\frac{\frac{\delta}{\gamma} \frac{R_n}{L}}{1 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_l}{r_b}} + \frac{2 LAI(C_{a-H_2O_s} - C_{a-H_2O})}{\left(1 + \frac{\delta}{\gamma}\right) r_b + r_l} \right] \quad (3.3)$$

donde A_s [m²] es el área de la superficie del suelo, δ [Pa K⁻¹] es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación, γ [Pa K⁻¹] es la constante psicrométrica termodinámica, L [J kg⁻¹] es el calor latente de evaporación del agua, LAI [m²(hoja) m⁻²(suelo)] es el índice de área foliar, r_b [s m⁻¹] es la resistencia aerodinámica y r_l [s m⁻¹] es la resistencia estomática.

La radiación neta que absorbe el dosel R_n [W m⁻²] se calcula con (Bontsema *et al.*, 2007):

$$R_n = c_{Rn} [1 - \exp(-k_{cu-Is} LAI)] I_{sol} \quad (3.4)$$

donde k_{cu-Is} [—] es el coeficiente de extinción para radiación de onda corta del cultivo y c_{Rn} es un coeficiente empírico que se debe estimar. La radiación global en el interior del invernadero que alcanza al cultivo I_{sol} [W m²] se determina con

$$I_{sol} = \tau_{cb-Is} I_e \quad (3.5)$$

con τ_{cb-Is} [—] la transmisividad de la cubierta del invernadero a la radiación solar y I_e [W m⁻²] es la radiación solar en el exterior.

La resistencia aerodinámica r_b [s m⁻¹] se calcula en base a la velocidad media del aire en el interior del invernadero v_a [m s⁻¹] (Boulard y Wang, 2000):

$$r_b = 220 \frac{(d_{cu})^{0.2}}{(v_a)^{0.8}} \quad (3.6)$$

donde d_{cu} [m] es la longitud característica de las hojas del cultivo. La velocidad del aire en el interior del invernadero se estima con la expresión (Boulard y Wang, 2000)

$$v_a = \frac{\Phi_{a-e}}{A_{sec}} \quad (3.7)$$

donde Φ_{a-e} [m³ s⁻¹] es el flujo de ventilación (Ecuación 3.12) y A_{sec} [m²] es el área de la sección del invernadero perpendicular al flujo de ventilación.

La resistencia estomática r_s [s m^{-1}] se modela con la relación empírica propuesto por Wang y Boulard (1991), en función de la radiación global en el interior del invernadero que alcanza al cultivo I_{sol} [W m^2] y del déficit de saturación de vapor de agua del aire D_a [Pa]:

$$r_s = 200 \left\{ 1 + \frac{1}{\exp [0.05 (I_{sol} - 50)]} \right\} \left\{ 1 + 0.11 \exp \left[0.34 \left(\frac{D_a}{100} - 10 \right) \right] \right\} \quad (3.8)$$

3.3.3.2. Condensación de agua en la superficie interior de la cubierta

Se asume que el agua que se condensa es inmediatamente removida, y por tanto no disponible para evaporación. La tasa de flujo de masa de vapor de agua $\Phi_{m(cb-a)}$ [$\text{kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{ s}^{-1}$] del aire interior a la superficie interior de la cubierta debido a la condensación es

$$\Phi_{m(cb-a)} = \text{máx} [A_{cb} k_{cb-a} (C_{a-H_2O} - C_{cb-H_2O_s}), 0] \quad (3.9)$$

donde A_{cb} [m^2] es la área de la superficie de la cubierta, k_{a-cb} [m s^{-1}] es el coeficiente de transferencia de masa de vapor de agua del aire interior a la superficie interior de la cubierta, $C_{cb-H_2O_s}$ [$\text{kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{ m}^{-3}(\text{aire})$] es la concentración a saturación de vapor de agua a la temperatura de la superficie interior de la cubierta y C_{a-H_2O} [$\text{kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{ m}^{-3}(\text{aire})$] es la concentración de vapor de agua del aire interior. Si $(C_{a-H_2O} \leq C_{cb-H_2O_s})$ entonces no hay condensación, esto es, $\Phi_{m(cb-a)} = 0$.

El coeficiente de transferencia de masa de vapor de agua k_{cb-a} [m s^{-1}] del aire interior a la superficie interior de la cubierta es definido por Bot (1983) como

$$k_{cb-a} = \frac{\alpha_{cb-a}}{\rho_a c_{p,a} \text{Le}^{2/3}} \quad (3.10)$$

donde α_{cb-a} [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$] es el coeficiente de transferencia de calor del aire interior a la superficie interior de la cubierta (Ecuación 3.18), ρ_a [kg m^{-3}] es la densidad del aire, $c_{p,a}$ [$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$] es la capacidad de calor específica del aire y $\text{Le} = 0.89$ [—] es el número de Lewis para vapor de agua en aire.

3.3.3.3. Transporte de vapor de agua debido a ventilación

La tasa de flujo de vapor de agua $\Phi_{m(a-e)}$ [$\text{kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{ s}^{-1}$] del aire interior al aire exterior es descrito por

$$\Phi_{m(a-e)} = \Phi_{a-e} (C_{a_H2O} - C_{e_H2O}) \quad (3.11)$$

donde Φ_{a-e} [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$] es el flujo de ventilación (Ecuación 3.12), C_{a_H2O} [kg m^{-3}] es la concentración de vapor de agua del aire interior y C_{e_H2O} [kg m^{-3}] es la concentración de vapor de agua del aire exterior.

3.3.3.4. Modelación de la ventilación

El flujo de ventilación Φ_{a-e} [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$] es la suma de la ventilación a través de las ventanas y la ventilación por la filtración

$$\Phi_{a-e} = \Phi_{fil} + (1 - \zeta) \Phi_{ven} \quad (3.12)$$

donde Φ_{fil} [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$] es la ventilación debido a fugas de la construcción del invernadero, Φ_{ven} [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$] es la ventilación a través de las ventanas y ζ [—] es un coeficiente de reducción de ventilación debido a la malla anti-insectos instalados en las ventanas.

El flujo de ventilación Φ_{fil} [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$] se describe por (van Ooteghem, 2007)

$$\Phi_{fil} = A_s (c_{fil1} + c_{fil2} v_e) \quad (3.13)$$

donde A_s [m^2] es el área de la superficie del suelo, v_e [m s^{-1}] es la velocidad del aire en el exterior, c_{fil1} y c_{fil2} son coeficientes empíricos que se deben estimar.

El flujo de ventilación Φ_{ven} [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$] del invernadero equipado con ventanas cenitales y ventanas laterales se determina por:

$$\Phi_{ven} = C_d \left\{ \left[\frac{(A_c A_l)^2}{A_c^2 + A_l^2} \right] \left[2g \frac{(T_a - T_e)}{T_e} h \right] + \left(\frac{A_T}{2} \right)^2 C_w v_e^2 \right\}^{1/2} \quad (3.14)$$

donde A_c [m^2] es el área de ventanas cenitales, A_l [m^2] es el área de ventanas laterales, A_T [m^2] es el área total de la superficie de ventanas, v_e [m s^{-1}] es la velocidad del

aire en el exterior del invernadero, C_w [—] es el coeficiente de efecto de viento, C_d [—] es el coeficiente de descarga, g [m s⁻²] es la constante gravitacional, T_a [K] es la temperatura del aire interior, T_e [K] es la temperatura del aire exterior y h [m] es la distancia vertical entre los centros de las ventanas lateral y cenital.

3.3.4. Modelado de la temperatura de la cubierta

La temperatura en la cubierta del invernadero (sin considerar los procesos de conducción), se modela con la ecuación de balance:

$$\frac{dT_{cb}}{dt} = \frac{Q_{sol(cb)} - Q_{cnv(cb-a)} - Q_{cnv(cb-e)} + Q_{lt(cb)} + Q_{rad(s1-cb)} - Q_{rad(cb-cu)} - Q_{rad(cb-sk)}}{\rho_{cb} c_{p,cb} V_{cb}} \quad (3.15)$$

donde $Q_{sol(cb)}$ [W] la radiación de onda corta absorbida por la cubierta, $Q_{cnv(cb-a)}$ [W] la transferencia de calor por convección con el aire interior, $Q_{cnv(cb-e)}$ [W] la transferencia de calor por convección con el aire exterior, $Q_{lt(cb)}$ [W] el calor latente producido por condensación en la superficie interior de la cubierta, $Q_{rad(s1-cb)}$ [W] es la radiación térmica que emite el suelo y absorbe la cubierta, $Q_{rad(cb-cu)}$ [W] es la radiación térmica que emite la cubierta y absorbe el cultivo, $Q_{rad(cb-sk)}$ [W] es la radiación térmica que emite la cubierta y absorbe la bóveda celeste, $c_{p,cb}$ [J kg⁻¹ K⁻¹] es el calor específico del material de la cubierta, ρ_{cb} [kg m⁻³] es la densidad del material de la cubierta y V_{cb} [m³] es el volumen de la cubierta.

A continuación se describen los flujos considerados en la ecuación de balance.

3.3.4.1. Radiación solar absorbida por la cubierta

La radiación solar absorbida por la cubierta $Q_{sol(cb)}$ [W] se describe por:

$$Q_{sol(cb)} = \eta_{cb,Is} A_{cb} I_e \quad (3.16)$$

donde A_{cb} [m²] es el área de la superficie externa de la cubierta, $\eta_{cb,Is}$ [—] es el coeficiente de absorción de la cubierta a la radiación solar y I_e [W m⁻²] la radiación solar global en el exterior.

3.3.4.2. *Transferencia de calor por convección con el aire interior*

La transferencia de calor por convección con el aire interior $Q_{cnv(cb-a)}$ [W] se describe por:

$$Q_{cnv(cb-a)} = \alpha_{cb-a} A_{cb} (T_{cb} - T_a) \quad (3.17)$$

donde A_{cb} [m²] es el área de la superficie interna de la cubierta, T_{cb} [K] es la temperatura de la superficie interna de la cubierta y T_a [K] es la temperatura del aire interior.

El coeficiente transferencia de calor por convección promedio α_{cb-a} [W m⁻² K⁻¹] del aire interior a la cubierta se modela en función de la diferencia de temperaturas entre el aire interior y la superficie interna de la cubierta, y se calcula con

$$\alpha_{cb-a} = c_{cb-a1} |T_a - T_{cb}|^{1/3} \quad (3.18)$$

donde c_{cb-a1} es un coeficiente empírico que se debe estimar.

3.3.4.3. *Transferencia de calor por convección con el aire exterior*

La transferencia de calor por convección con el aire exterior $Q_{cnv(cb-e)}$ [W] se describe por:

$$Q_{cnv(cb-e)} = \alpha_{cb-e} A_{cb} (T_{cb} - T_e) \quad (3.19)$$

donde A_{cb} [m²] es el área de la superficie externa de la cubierta, T_{cb} [K] es la temperatura de cubierta y T_e [K] es la temperatura del aire exterior.

El coeficiente de transferencia de calor por convección promedio α_{cb-e} [W m⁻² K⁻¹] del aire exterior a la cubierta se modela en función de la velocidad del viento exterior v_e [m s⁻¹] y se calcula con la relación:

$$\alpha_{cb-e} = c_{cb-e1} + c_{cb-e2} (v_e)^{c_{cb-e3}} \quad (3.20)$$

donde c_{cb-e1} , c_{cb-e2} y c_{cb-e3} son coeficientes empíricos a estimar.

3.3.4.4. *Transferencia de calor latente producido por condensación*

La transferencia de calor latente producido por condensación $Q_{lt(cb)}$ [W] se describe por:

$$Q_{lt(cb)} = L \Phi_{m(cb-a)} \quad (3.21)$$

donde L [J kg⁻¹] es el calor latente de evaporación del agua y $\Phi_{m(cb-a)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] es la tasa de flujo de masa de vapor de agua del aire interior a la superficie interior de la cubierta por condensación (Ecuación 3.9).

3.3.4.5. *Absorción de radiación térmica desde la superficie exterior de la cubierta hacia la bóveda celeste*

La radiación térmica $Q_{rad(cb-sk)}$ [W] emitida por la superficie exterior de la cubierta y absorbida por la bóveda celeste es definido por

$$Q_{rad(cb-sk)} = A_{cb} E_{cb} E_{sk} F_{cb-sk} \sigma (T_{cb}^4 - T_{sk}^4) \quad (3.22)$$

donde A_{cb} [m²] es el área de la superficie de la cubierta, E_{cb} [—] es el coeficiente de emisividad de la cubierta, E_{sk} [—] es el coeficiente de emisividad de la bóveda celeste, F_{cb-sk} es el factor de forma de la superficie exterior de la cubierta a la bóveda celeste, σ [W m⁻² K⁻⁴] es la constante de Stefan-Boltzmann, T_{cb} [K] es la temperatura de la superficie exterior de la cubierta y T_{sk} [K] es la temperatura de la bóveda celeste.

3.3.4.6. *Absorción de radiación térmica desde la superficie interior de la cubierta hacia el cultivo*

La radiación térmica $Q_{rad(cb-cu)}$ [W] emitida por la cubierta y absorbida por el cultivo es definido por

$$Q_{rad(cb-cu)} = A_{cb} E_{cb} E_{cu} F_{cb-cu} \sigma (T_{cb}^4 - T_{cu}^4) \quad (3.23)$$

donde A_{cb} [m²] es el área de la superficie interior de la cubierta, E_{cb} [—] es el coeficiente de emisividad de la cubierta, E_{cu} [—] es el coeficiente de emisividad

del cultivo, σ [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$] es la constante de Stefan-Boltzmann, T_{cb} [K] es la temperatura de la superficie interior de la cubierta y T_{cu} [K] es la temperatura del cultivo.

El factor de forma F_{cb-cu} de la superficie interior de la cubierta al cultivo se describe por:

$$F_{cb-cu} = (1 - \tau_{cu-Il}) F_{cb-sk} \quad (3.24)$$

donde τ_{cu-Il} es la transmitancia de radiación térmica por el cultivo y F_{cb-sk} es el factor de forma de la cubierta a la bóveda celeste.

3.3.4.7. *Absorción de radiación térmica desde el suelo hacia la superficie interior de la cubierta*

La radiación térmica $Q_{rad(s1-cb)}$ [W] emitida por el suelo y absorbida por la cubierta es definido por

$$Q_{rad(s1-cb)} = A_s E_s E_{cb} F_{s-cb} \sigma (T_{s1}^4 - T_{cb}^4) \quad (3.25)$$

donde A_s [m^2] es el área de la superficie del suelo, E_s [—] es el coeficiente de emisividad del suelo, E_{cb} [—] es el coeficiente de emisividad de la cubierta, σ [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$] es la constante de Stefan-Boltzmann, T_{s1} [K] es la temperatura de la superficie del suelo y T_{cb} [K] es la temperatura de la superficie interior de la cubierta.

El factor de forma F_{s-cb} del suelo a la superficie interior de la cubierta se describe por:

$$F_{s-cb} = 1 - F_{s-cu} \quad (3.26)$$

donde F_{s-cu} es el factor de forma del suelo al cultivo (Ecuación 3.42).

3.3.5. Modelado de la temperatura del aire

Modelo de la temperatura del aire en el interior del invernadero:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{cnv(cb-a)} + Q_{cnv(s1-a)} - Q_{sn(a-e)} - Q_{lt(cu-a)}}{\rho_a c_{p,a} V_a} \quad (3.27)$$

donde ρ_a [kg m⁻³] es la densidad del aire, c_{p-a} [J kg⁻¹ K⁻¹] es el calor específico del aire y V_a [m³] es el volumen de aire que ocupa el invernadero. $Q_{cnv(cb-a)}$ [W] es la transferencia de calor por convección entre la superficie interior de la cubierta y el aire, $Q_{cnv(s1-a)}$ [W] es la transferencia de calor por convección con la superficie del suelo, $Q_{sn(a-e)}$ [W] es el intercambio de calor sensible con el aire exterior debido a la ventilación natural e infiltración, $Q_{lt(cu-a)}$ [W] es el calor latente producido por la transpiración del cultivo.

3.3.5.1. Transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire interior

La transferencia de calor por convección $Q_{cnv(s1-a)}$ [W] del aire interior a la superficie del suelo se define por

$$Q_{cnv(s1-a)} = \alpha_{s1-a} A_s (T_{s1} - T_a) \quad (3.28)$$

donde T_{s1} [K] es la temperatura de la superficie del suelo y T_a [K] es la temperatura del aire interior.

El coeficiente de transferencia de calor α_{s1-a} [W m⁻² K⁻¹] del aire interior a el suelo se modela por

$$\alpha_{s1-a} = \begin{cases} c_{s1-a1} (T_{s1} - T_a)^{1/3} & \forall T_a < T_{s1} \\ c_{s1-a2} (T_a - T_{s1})^{1/4} & \forall T_a \geq T_{s1} \end{cases} \quad (3.29)$$

donde c_{s1-a1} y c_{s1-a2} son coeficientes empíricos a estimar.

3.3.5.2. Transferencia de calor con el aire exterior debido a ventilación

El intercambio de calor $Q_{sn(a-e)}$ [W] con el aire exterior debido a la ventilación natural se define por

$$Q_{sn(a-e)} = \rho_a c_{p-a} \Phi_{a-e} (T_a - T_e) \quad (3.30)$$

donde ρ_a [kg m⁻³] es la densidad del aire, $c_{p,a}$ [J kg⁻¹ K⁻¹] es la capacidad de calor específica del aire, Φ_{a-e} [m³ s⁻¹] es el flujo de ventilación (Ecuación 3.14), T_a [K] es la temperatura del aire interior y T_e [K] es la temperatura del aire exterior.

3.3.5.3. *Transferencia de calor latente por transpiración del cultivo*

La transferencia de calor calor latente $Q_{lt(cu-a)}$ [W] del cultivo al aire interior por transpiración se define por

$$Q_{lt(cu-a)} = L \Phi_{m(cu-a)} \quad (3.31)$$

donde L [J kg⁻¹] es el calor latente de evaporación del agua y $\Phi_{m(cu-a)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] es la tasa de flujo de masa de vapor de agua del cultivo al aire interior por transpiración (Ecuación 3.3).

3.3.6. *Modelado de la temperatura del suelo*

La temperatura del suelo T_s [K] es descrito por un modelo que consiste de 4 capas. El espesor [m] de las capas subsecuentes, a partir de la superficie hacia el fondo son: $d_{s1} = 0.05$, $d_{s2} = 0.10$, $d_{s3} = 0.20$ y $d_{s4} = 0.40$.

La derivada de la temperatura la primera capa de suelo (capa superficial) dT_{s1} [K s⁻¹] es

$$\frac{dT_{s1}}{dt} = \frac{Q_{sol(s1)} - Q_{cnv(s1-a)} - Q_{cnd(s1-s2)} - Q_{\Sigma rad(s1)}}{\rho_{s1} c_{p,s1} V_{s1}} \quad (3.32)$$

donde $Q_{sol(s1)}$ [W] es la radiación de onda corta absorbida por la superficie del suelo, $Q_{cnv(s1-a)}$ [W] es la transferencia de calor por convección con el aire interior del invernadero, $Q_{cnd(s1-s2)}$ [W] es la transferencia de calor por conducción con la segunda capa de suelo, $Q_{\Sigma rad(s1)}$ [W] es la radiación de onda larga absorbida por la superficie del suelo, A_s [m²] es el área de la superficie del suelo, ρ_{s1} [kg m⁻³] es la densidad del material de la primera capa suelo y $c_{p,s1}$ [J kg⁻¹ K⁻¹] es la capacidad de calor específico del material de la primera capa del suelo.

La radiación térmica neta que absorbe la superficie del suelo se calcula como

$$Q_{\Sigma rad(s1)} = Q_{rad(s1-cu)} + Q_{rad(s1-cb)} + Q_{rad(s1-sk)} \quad (3.33)$$

donde $Q_{rad(s1-cu)}$ [W] es la radiación térmica que emite el suelo y absorbe el cultivo, $Q_{rad(s1-cb)}$ [W] es la radiación térmica que emite el suelo y absorbe la cubierta y $Q_{rad(s1-sk)}$ [W] es la radiación térmica que emite el suelo y absorbe la bóveda celeste.

La derivada de la temperatura de las capas inferiores de suelo $dT_{s\{i\}}$ [K s⁻¹] son:

$$\frac{dT_{s\{i\}}}{dt} = \frac{Q_{s\{i-1,i\}} - Q_{s\{i,i+1\}}}{\rho_s c_{p-s} A_s d_{si}} \quad \forall i = 2, 3, 4 \quad (3.34)$$

La transferencia de calor por conducción $Q_{s\{i,i+1\}}$ [W] entre dos capas i y $i + 1$ es:

$$Q_{s\{i,i+1\}} = A_s \frac{\lambda_{s\{i,i+1\}}}{dx_{s\{i,i+1\}}} (T_{s\{i\}} - T_{s\{i+1\}}) \quad (3.35)$$

donde A_s [m²] es el área superficial del suelo, λ_s [W m⁻¹ K⁻¹] es la conductividad térmica, dx_s [m] es la distancia entre los centros de las capas y T_s [K] es la temperatura de la capa de suelo. La distancia $dx_{s\{i,i+1\}}$ [m] son: $dx_{s\{1,2\}} = 0.075$, $dx_{s\{2,3\}} = 0.15$, $dx_{s\{3,4\}} = 0.30$ y $dx_{s\{4,sub\}} = 0.20$. La temperatura del subsuelo T_{sub} es una condición de contorno.

3.3.6.1. Radiación solar absorbida por la superficie del suelo

La radiación de onda corta $Q_{sol(s1)}$ [W] absorbida por la superficie del suelo se define por

$$Q_{sol(s1)} = A_s \eta_{s-Is} I_o \quad (3.36)$$

donde A_s [m²] es el área de la superficie del suelo y I_o [W m⁻²] es la radiación global en el exterior.

El coeficiente de absorción de onda corta del suelo η_{s-Is} [—] se define por (van Ooteghem, 2007)

$$\eta_{s-Is} = \tau_{cb-Is} [\tau_{cu-Il} + (1 - \tau_{cu-Il}) \tau_{cu-Is}] \quad (3.37)$$

donde τ_{cb-Is} [—] es la transmisividad de la cubierta del invernadero a la radiación de onda corta, τ_{cu-Is} [—] es la transmisividad del cultivo a la radiación de onda corta y τ_{cu-Il} [—] es la transmisividad del cultivo a la radiación de onda larga. El término $\tau_{cu-Il} + (1 - \tau_{cu-Il})$ es usado para la transmitancia total del cultivo a la radiación.

La transmitancia de radiación de onda corta τ_{cu-Is} por el cultivo se calcula en base al coeficiente de extinción k_{cu-Is} [—] para radiación de onda corta por el cultivo y el índice de área foliar LAI [$\text{m}^2(\text{hoja}) \text{ m}^{-2}(\text{suelo})$]

$$\tau_{cu-Is} = \exp(-k_{cu-Is} LAI) \quad (3.38)$$

La transmitancia de radiación de onda larga τ_{cu-Il} por el cultivo se calcula en base al coeficiente de extinción k_{cu-Il} [—] para radiación de onda larga por el cultivo y el índice de área foliar LAI [$\text{m}^2(\text{hoja}) \text{ m}^{-2}(\text{suelo})$]

$$\tau_{cu-Il} = \exp(-k_{cu-Il} LAI) \quad (3.39)$$

3.3.6.2. *Transferencia de calor por conducción entre la capa superficial y la segunda capa de suelo*

La transferencia de calor por conducción $Q_{cnd(s1-s2)}$ [W] entre la capa superficial y la segunda capa del suelo se define por

$$Q_{cnd(s1-s2)} = A_s \frac{\lambda_{(s1-s2)}}{dx_{(s1-s2)}} (T_{s1} - T_{s2}) \quad (3.40)$$

donde $\lambda_{(s1-s2)}$ [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$] es el coeficiente de conducción de calor entre la primera y segunda capa de suelo, $dx_{(s1-s2)}$ [m] es la distancia entre los centros de la primera y segunda capa de suelo, T_{s1} [K] y T_{s2} [K] son las temperaturas de la primera y segunda capa del suelo.

3.3.6.3. *Absorción de radiación de onda larga del suelo hacia el cultivo*

La radiación térmica $Q_{rad(s1-cu)}$ [W] emitida por el suelo y absorbido por el cultivo es definido por

$$Q_{rad(s1-cu)} = A_s E_s E_{cu} F_{s-cu} \sigma (T_{s1}^4 - T_{cu}^4) \quad (3.41)$$

donde A_s [m^2] es el área de la superficie del suelo, E_s [—] es el coeficiente de emisividad del suelo, E_{cu} [—] es el coeficiente de emisividad del cultivo, T_{s1} [K] es la temperatura del suelo y T_{cu} [K] es la temperatura del cultivo.

El factor de forma F_{s-cu} del suelo a el cultivo se describe por:

$$F_{s-cu} = 1 - \tau_{cu-Il} \quad (3.42)$$

donde τ_{cu-Il} es la transmitancia de radiación de onda larga por el cultivo.

3.3.6.4. Absorción de radiación de onda larga del suelo a la bóveda celeste

La radiación térmica $Q_{rad(s1-sk)}$ [W] emitida por el suelo y absorbido por la bóveda celeste es definido por

$$Q_{rad(s1-sk)} = A_s E_s E_{sk} F_{s-sk} \sigma (T_{s1}^4 - T_{sk}^4) \quad (3.43)$$

donde A_s [m²] es el área de la superficie del suelo, E_s [—] es el coeficiente de emisividad del suelo, E_{sk} [—] es el coeficiente de emisividad de la bóveda celeste, T_{s1} [K] es la temperatura de la superficie del suelo y T_{sk} [K] es la temperatura de la bóveda celeste.

El factor de forma F_{s-sk} del suelo a la bóveda celeste se describe por:

$$F_{s-sk} = (1 - F_{s-cu}) \tau_{cb-Il} \quad (3.44)$$

donde F_{s-cu} es el factor de forma del suelo al cultivo (Ecuación 3.42) y τ_{cb-Il} [—] es la transmisividad de la cubierta del invernadero a la radiación térmica.

3.4. MODELO SIMPLIFICADO PARA CONTROL DEL CLIMA DEL INVERNADERO

Lo importante de un modelo dinámico para propósitos de control es su capacidad de captar la dinámica dominante del sistema, por lo que se pueden utilizar modelos basados en principios físicos simplificados que sean capaces de captar la dinámica de las principales variables del clima del invernadero.

3.4.1. Supuestos de modelado

En el desarrollo del modelo se hacen las siguientes supuestos:

- El invernadero es considerado como un volumen de aire delimitado por las paredes, el techo y el suelo.
- Las variables de estado del sistema son la humedad del aire, C_{a-H_2O} [kg(H₂O) m⁻³]; la temperatura del aire, T_a [K]; y la temperatura del suelo, T_s [K].
- Las entradas externas y perturbaciones que actúan sobre el sistema y que se consideran como condiciones de contorno son: la temperatura del aire exterior, T_e [K]; el contenido de humedad del aire exterior, C_{e-H_2O} ; la velocidad del viento exterior, v_e ; la radiación global en el exterior, I_e [W m²]; la temperatura del subsuelo, T_{sub} [K], y el índice de área foliar, LAI [m²(hoja) m⁻²(suelo)].
- Entradas de control del sistema son la posición de las ventanas laterales U_{lat} [m²] y cenitales U_{cen} [m²].
- Se considera el principio de distribución homogénea de las variables, es decir, que se supone el mismo valor de las variables en el volumen de aire del invernadero.
- Con respecto a los procesos relacionados con la radiación solar, se asume que el aire no es inerte a la radiación (la absorbe y la transmite) y no se consideran los efectos de la reflexión.
- Las características físicas del aire, como la densidad o el calor específico, se consideran constantes con la temperatura y el tiempo.

3.4.2. Modelado de la humedad del aire

El balance de masa de vapor de agua del interior del invernadero C_{a_H2O} [kg(agua) m⁻³] se define en términos de la variación de la cantidad absoluta de vapor de agua:

$$\frac{dC_{a_H2O}}{dt} = \frac{\Phi_{m(cu-a)} - \Phi_{m(cb-a)} - \Phi_{m(a-e)}}{V_a} \quad (3.45)$$

donde V_a [m³] es el volumen que ocupa el aire del invernadero, $\Phi_{m(cu-a)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] es la transpiración del cultivo, $\Phi_{m(cb-a)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] es la condensación en la superficie interior de la cubierta y $\Phi_{m(a-e)}$ [kg(H₂O) s⁻¹] es el flujo de vapor por ventilación e infiltración.

El flujo de masa de vapor de agua por transpiración del cultivo se calcula con la ecuación de Penman-Monteith modificado por Stanghellini:

$$\Phi_{m(cu-a)} = A_s \left\{ \frac{\frac{\delta}{\gamma} \frac{R_n}{L}}{1 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_l}{r_b}} + \frac{2 LAI (C_{a_H2O_s} - C_{a_H2O})}{\left(1 + \frac{\delta}{\gamma}\right) r_b + r_l} \right\} \quad (3.46)$$

donde A_s [m²] es el área de la superficie del suelo, δ [Pa K⁻¹] es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación, γ [Pa K⁻¹] es la constante psicrométrica termodinámica, L [J kg⁻¹] es el calor latente de evaporación del agua, LAI [m²(hoja) m⁻²(suelo)] es el índice de área foliar, r_b [s m⁻¹] es la resistencia aerodinámica y r_l [s m⁻¹] es la resistencia estomática.

La radiación neta que absorbe el dosel R_n [W m⁻²] se calcula con (Bontsema *et al.*, 2007):

$$R_n = c_{Rn} [1 - \exp(-k_{cu_Is} LAI)] I_{sol} \quad (3.47)$$

donde k_{cu_Is} [—] es el coeficiente de extinción para radiación solar por el cultivo y c_{Rn} es un coeficiente empírico a estimar. La radiación global en el interior que alcanza al cultivo $I_{sol} = \tau_{cb_Is} I_e$ [W m⁻²] con τ_{cb_Is} [—] la transmisividad de la cubierta a la radiación solar y I_e [W m⁻²] la radiación global que llega en el exterior.

Con la finalidad de mantener el modelo simple, se asume un valor constante de la resistencia de capa límite $r_b = 200$ [s m⁻¹] (Wang y Boulard, 2000). La resistencia

interna o estomática r_s [$s \text{ m}^{-1}$] se modela con la relación empírica propuesto por Boulard *et al.* (1991), en función de la radiación global que alcanza al cultivo I_{sol} [$W \text{ m}^{-2}$]:

$$r_s = 200 \left\{ 1 + \frac{1}{\exp [0.05(I_{sol} - 50)]} \right\} \quad (3.48)$$

La tasa de flujo de masa de vapor de agua del aire interior a la superficie interior de la cubierta por condensación:

$$\Phi_{m(cb-a)} = \text{máx} [A_{cb} k_{cb-a} (C_{a_{H_2O}} - C_{cb_{H_2O}}), 0] \quad (3.49)$$

donde A_{cb} [m^2] es la área de la superficie de la cubierta, k_{cb-a} [$m \text{ s}^{-1}$] es el coeficiente de transferencia de masa de vapor de agua del aire interior a la superficie interior de la cubierta, $C_{cb_{H_2O}}$ [$kg(H_2O) \text{ m}^{-3}(\text{aire})$] es la concentración a saturación de vapor de agua a la temperatura de la superficie interior de la cubierta y $C_{a_{H_2O}}$ [$kg(H_2O) \text{ m}^{-3}(\text{aire})$] es la concentración de vapor de agua del aire interior. Si $(C_{a_{H_2O}} \leq C_{cb_{H_2O}})$ entonces no hay condensación, esto es, $\Phi_{m(cb-a)} = 0$.

El coeficiente de transferencia de masa de vapor de agua del aire interior a la superficie interior de la cubierta es definido por Bot (1983) como

$$k_{cb-a} = \frac{\alpha_{cb-a}}{\rho_a c_{p,a} Le^{2/3}} \quad (3.50)$$

donde ρ_a [$kg \text{ m}^{-3}$] es la densidad del aire, $c_{p,a}$ [$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$] es la capacidad de calor específica del aire y $Le = 0.89$ [—] es el número de Lewis para vapor de agua en aire. El coeficiente transferencia de calor por convección promedio α_{cb-a} [$W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$] del aire interior a la cubierta es función de la diferencia de temperaturas entre el aire y la superficie interna de la cubierta:

$$\alpha_{cb-a} = c_{cb-a1} |T_a - T_{cb}|^{1/3} \quad (3.51)$$

donde c_{cb-a1} es un coeficiente empírico que se debe estimar.

La tasa de flujo de vapor de agua del aire interior al aire exterior por infiltración y ventilación natural:

$$\Phi_{m(a-e)} = \Phi_{ven,malla} (C_{a_{H_2O}} - C_{e_{H_2O}}) \quad (3.52)$$

donde $\Phi_{ven,malla}$ [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] es el flujo de ventilación del invernadero (Ecuación 3.60), C_{a_H2O} [kg m^{-3}] es la concentración de vapor de agua del aire interior y C_{e_H2O} [kg m^{-3}] es la concentración de vapor de agua del aire exterior.

3.4.3. Modelo de la temperatura del aire

El balance de calor sensible en el interior del invernadero define la tasa de cambio de la temperatura, dT_a/dt , que en forma de ecuación diferencial es:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{sol(a)} + Q_{cnv(a-e)} + Q_{cnv(s-a)} - Q_{ven} - Q_{lt(cu-a)}}{\rho_a c_{p-a} V_a} \quad (3.53)$$

donde ρ_a [kg m^{-3}] es la densidad del aire, c_{p-a} [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] es el calor específico del aire, V_a [m^3] es el volumen de aire que ocupa el invernadero, $Q_{sol(a)}$ [W] es la radiación solar absorbida por el aire interior del invernadero, $Q_{cnv(a-e)}$ [W] es la transferencia de calor por convección y conducción entre el aire interior y exterior del invernadero, $Q_{cnv(s-a)}$ [W] es la transferencia de calor por convección con la superficie del suelo, Q_{ven} [W] es el intercambio de calor con el aire exterior debido a la ventilación natural e infiltración y $Q_{lt(cu-a)}$ [W] es el calor latente producido por la transpiración del cultivo.

La radiación solar que atraviesa la cubierta y que en parte es absorbida por el aire:

$$Q_{sol(a)} = A_s \eta_a I_{sol} \quad (3.54)$$

donde A_s [m^2] es el área de la superficie del suelo y η_a [—] es el coeficiente de absorción de radiación solar del aire del invernadero (eficiencia térmica de la energía solar).

La transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire interior, $Q_{cnv(s-a)}$, depende principalmente de la diferencial de temperatura, y, para el caso de un cultivo hidropónico, la transferencia de calor desde el suelo debido a la evaporación de agua es despreciable:

$$Q_{cnv(s-a)} = A_s \alpha_{s-a} (T_s - T_a) \quad (3.55)$$

donde T_s [K] es la temperatura de la superficie del suelo. El coeficiente de transferencia de calor α_{s-a} [W m⁻² K⁻¹] se modela por

$$\alpha_{s-a} = c_{s-a1} |T_s - T_a|^{1/3} \quad (3.56)$$

donde c_{s-a1} es un coeficiente empírico que se debe estimar.

La transferencia de calor por convección y conducción entre la cubierta y el aire exterior, depende en la diferencial entre la temperatura del aire interior y exterior del invernadero:

$$Q_{cnv(a-e)} = A_{cb} \alpha_{a-e} (T_a - T_e) \quad (3.57)$$

donde A_{cb} [m²] es el área de la superficie de la cubierta. El coeficiente de transferencia de calor por convección α_{a-e} [W m⁻² K⁻¹] se modela en función de la velocidad del viento exterior v_e [m s⁻¹]:

$$\alpha_{a-e} = c_{a-e1} + c_{a-e2} v_e \quad (3.58)$$

donde c_{a-e1} y c_{a-e2} son coeficientes empíricos a estimar.

La pérdida de calor por ventilación e infiltración es proporcional a la tasa de intercambio de aire y a la diferencial de la temperatura del aire interior y exterior:

$$Q_{ven} = \rho_a c_{p,a} \Phi_{ven,malla} (T_a - T_e) \quad (3.59)$$

donde $\Phi_{ven,malla}$ [m³ s⁻¹] es el flujo de ventilación del invernadero equipado con malla anti-insectos, y es la suma de la ventilación a través de las ventanas y por la filtración:

$$\Phi_{ven,malla} = \Phi_{fil} + (1 - \zeta) \Phi_{ven} \quad (3.60)$$

donde Φ_{fil} [m³ s⁻¹] es la ventilación debido a fugas de la construcción del invernadero, Φ_{ven} [m³ s⁻¹] es la ventilación a través de las ventanas y ζ [—] es un coeficiente de reducción de ventilación debido a la malla anti-insectos instalados en las ventanas.

La filtración Φ_{fil} [m³ s⁻¹] y el flujo de ventilación Φ_{ven} [m³ s⁻¹] del invernadero:

$$\Phi_{fil} = c_{fil1} A_s \quad (3.61)$$

$$\Phi_{ven} = \frac{A_T}{2} C_d C_w^{0.5} v_e \quad (3.62)$$

donde c_{fil1} es un coeficiente empírico que se deben estimar $[\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}]$, A_T $[\text{m}^2]$ es el área total de ventilación, v_e $[\text{m s}^{-1}]$ es la velocidad del aire en el exterior del invernadero, C_w $[-]$ es el coeficiente de efecto de viento y C_d $[-]$ es el coeficiente de descarga.

La transferencia de calor calor latente $Q_{tra,cul}$ del dosel al aire interior por transpiración es proporcional a la tasa de transpiración:

$$Q_{tra,cul} = L \Phi_{m.c.a.H2O} \quad (3.63)$$

donde L $[\text{J kg}^{-1}]$ es el calor latente de evaporación del agua y $\Phi_{m.c.a.H2O}$ $[\text{kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{m}^{-2}(\text{suelo}) \text{s}^{-1}]$ es el flujo de masa de vapor de agua del cultivo al aire interior debido a la transpiración (Ecuación 3.3).

3.4.4. Modelado de la temperatura del suelo

En el modelado de la temperatura del suelo se ha dividido en dos capas: capa superficial de espesor $d_s = 0.05$ m, y una segunda capa con un espesor d_{sub} que debe estimarse, donde se considera la temperatura constante y es una condición de contorno.

El calor acumulado en la capa superficial del suelo, dT_s/dt , se puede calcular en función del balance de energía:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{Q_{sol(s)} - Q_{cnv(s-a)} - Q_{cnd(s-sub)}}{\rho_s c_{p-s} d_s A_s} \quad (3.64)$$

donde $Q_{sol(s)}$ $[\text{W}]$ es la radiación solar absorbida por la superficie del suelo, $Q_{cnv(s-a)}$ $[\text{W}]$ es la transferencia de calor por convección con el aire interior del invernadero, $Q_{cnd(s-sub)}$ $[\text{W}]$ es la transferencia de calor por conducción con la segunda capa de suelo, A_s $[\text{m}^2]$ es el área de la superficie del suelo, ρ_s $[\text{kg m}^{-3}]$ es la densidad del material de la primera capa suelo y c_{p-s} $[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$ es la capacidad de calor específico del material de la primera capa del suelo.

La radiación solar $Q_{sol(s)}$ {W} que absorbe la superficie del suelo se define por

$$Q_{sol(s)} = A_s \eta_{s-I_s} I_{sol} \quad (3.65)$$

donde A_s [m²] es el área de la superficie del suelo, η_{s-I_s} [—] es el coeficiente de absorción de onda corta del suelo.

La transferencia de calor por conducción $Q_{cnd(s-sub)}$ [W] entre la capa superficial de suelo y el subsuelo se define por

$$Q_{cnd(s-sub)} = A_s \frac{\lambda_{s-sub}}{dx_{s-sub}} (T_s - T_{sub}) \quad (3.66)$$

donde λ_{s-sub} [W m⁻¹ K⁻¹] es el coeficiente de conducción de calor de la primera capa de suelo, dx_{s-sub} [m] es la distancia entre los centros de la primera y segunda capas de suelo, T_s [K] y T_{sub} [K] son las temperaturas de la primera capa del suelo y el subsuelo, respectivamente. La temperatura del subsuelo es una condición de contorno. La profundidad dx_{s-sub} y el calor volumétrico específico (el producto entre la densidad y el calor específico) deben estimarse.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MODELO PARA SIMULACIÓN DEL CLIMA DEL INVERNADERO

El modelo se implementó en el ambiente MATLAB/SIMULINK. Este consta de un programa principal donde se definen los parámetros, las variables de entrada y las opciones de simulación; y un archivo C-MEX S-function donde se implementan las ecuaciones del modelo que es llamado por el programa principal a través de una archivo mdl de SIMULINK. Para obtener la solución numérica del modelo se utilizó el método de integración Runge-Kutta de cuarto orden con tamaño de paso de integración variable `ode45` con una tolerancia de 1×10^{-8} . El intervalo de tiempo de muestreo del modelo fue de un minuto.

El modelo del invernadero para propósitos de simulación del clima descrito en la sección 3.3 fue desarrollado para la evaluación de prácticas de manejo y de las características físicas de los elementos constructivos sobre el clima del invernadero. El modelo fue validado mediante la simulación con entradas de control conocidas u y entradas externas conocidas w . Los datos simulados resultantes fueron comparados con los datos medidos. Se encontró que las predicciones del modelo se aproximan bastante bien con los datos medidos en algunos días, pero en forma muy pobre en otros días. Para mejorar las predicciones, se realizó una estimación de parámetros.

Para estimar los parámetros seleccionados, los estados medidos (C_{a_H2O} , T_{cb} , T_a , T_{s1}) fueron comparados con los estados simulados. Los parámetros fueron ajustados con datos de tres días, del 3 al 5 de marzo de 2007. Los valores iniciales de los estados se basaron en los datos medidos. Las entradas externas se muestran en la Figura (4.1) y las variables de control en la Figura (4.2).

Para ajustar los parámetros se utilizaron 2 métodos: a) evolución diferencial (ED) y b) estrategias evolutivas con matriz de covarianza (CMA-ES). En evolución diferencial se utilizó la estrategia “DE/rand/1/bin”, probabilidad de cruzamiento $CR = 0.5$, factor de variación diferencial $F = 0.9$, tamaño de la población igual $NP = 2 \times n$ donde n es el número de parámetros a estimar, precisión de convergencia de la población 1×10^{-5} y número máximo de generaciones de 250. En CMA-ES se utilizó un tamaño de población $NP = 4 + \text{floor}(3 * \log(n))$ donde n es el número de parámetros a estimar, precisión de convergencia de la población 1×10^{-5} y número máximo de generaciones de 250. Se utilizó la implementación en MATLAB del algoritmo DE realizado por López (2005) y del algoritmo CMA-ES por Hansen (2006).

La función objetivo J a minimizar es la suma del cuadrado de los errores definida como:

$$J = \sum_{i=1}^M (\hat{y}(t_i, p) - y(t_i))^2 \quad (4.1)$$

$$p^* = \arg \min J(p) \quad (4.2)$$

donde M es el número de observaciones, $\hat{y}(t_i, p)$ es la salida simulada en el tiempo t_i , $y(t_i)$ en la medición en el tiempo t_i , p es el conjunto de parámetros de calibración del modelo y p^* son los parámetros que minimizan $J(p)$.

Para seleccionar de manera formal los parámetros del modelo para ser estimados, es necesario realizar un análisis de sensibilidad, proceso que es bastante laborioso. En el presente trabajo de investigación, los parámetros a ser calibrados fueron seleccionados de forma heurística, es decir, sin realizar un análisis de sensibilidad del modelo. Para calibrar sus modelos desarrollados, van Ooteghem (2007) y Rodríguez (2002), realizaron análisis de sensibilidad correspondientes. Como el modelo desarrollado en la presente investigación utiliza la descripción funcional de los procesos analizados por estos autores, los parámetros para ser calibrados se seleccionaron en base a la sensibilidad de los parámetros que estos dos autores reportan. En el

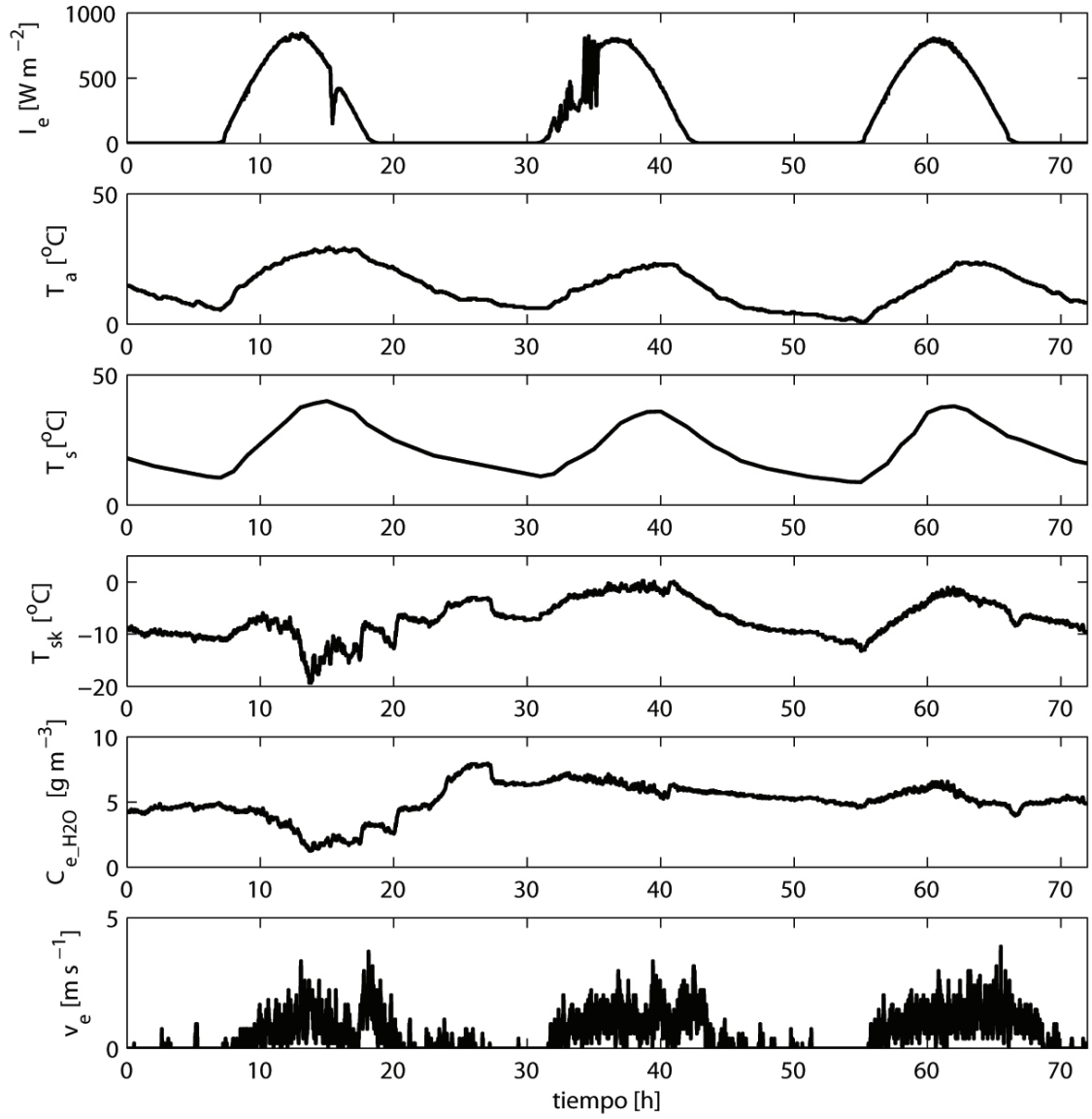


Figura 4.1: Entradas externas w utilizados en la calibración del modelo de simulación (3 al 5 de marzo de 2007), datos recolectados en Chapingo, México.

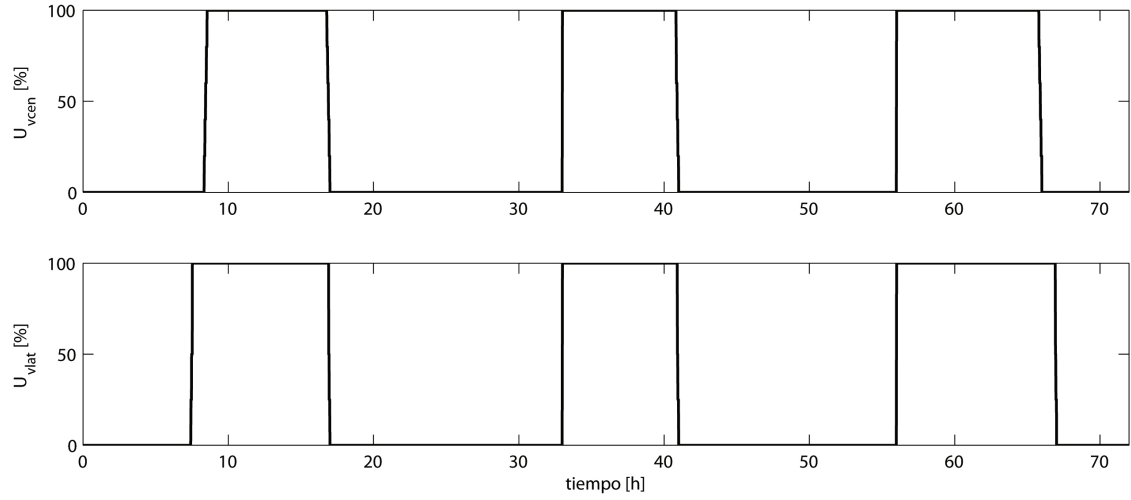


Figura 4.2: Entradas de control u utilizados en la calibración del modelo de simulación (3 al 5 de marzo de 2007).

Cuadro 4.1 se muestran los valores nominales de los parámetros utilizados para la calibración del modelo.

El procedimiento seguido para la estimación de los parámetros del modelo de simulación fue el siguiente.

- a. Calibración de la transmisión de radiación solar por la cubierta. Aunque la transmisividad del invernadero a la radiación solar τ_{cb-Is} varía según la posición del sol respecto al eje del invernadero, en este trabajo se considera que la transmisividad es constante a lo largo del día. Se estimó como el cociente de la radiación solar global en el exterior y la radiación solar global que alcanza al cultivo (medida a 1.5 m de altura sobre el suelo en el interior del invernadero). Se estimó el valor de $\tau_{cb-Is} = 0.81$.

- b. Estimación del coeficiente de descarga C_d . Este coeficiente depende de la geometría de la ventana y fue estimado con la ecuación propuesta por Bot (1983), $C_d = F_o^{-0.5}$ con:

$$F_o = 1.75 + 0.7 \exp[-(l_o/w_o)/32.5] \quad (4.3)$$

donde l_o [m] es la longitud de la ventana y w_o [m] es el ancho de la ventana.

Para las ventanas cenitales se determinó el valor de $C_d = 0.731$, para ventanas laterales $C_d = 0.701$, dando un valor promedio de $C_d = 0.715$.

- c. Calibración del modelo de la temperatura de la segunda, tercera y cuarta capas de suelo. Al considerar que el suelo es homogéneo en dirección vertical, esto es, que todas las capas tienen la misma densidad, capacidad de calor específica y conductividad térmica, los parámetros a estimar son cuatro: ρ_s , c_{p-s} , λ_s y T_{sub} . Como no se conocen los valores de ρ_s y c_{p-s} , se sustituyeron por la capacidad de calor volumétrico VHC_s , lo que reduce a tres los parámetros que se deben estimar. Utilizando la textura del suelo y suponiendo que el contenido de humedad de las capas de suelo eran del 50 % de la humedad aprovechable, se estimaron los siguientes valores: $VHC_s = 2405267$ y $\lambda_s = 1.5$. La temperatura del subsuelo se supuso constante e igual a la temperatura media anual $T_{sub} = 23.5$ °C.
- d. Modelo de temperatura de cubierta. Los parámetros que se requieren estimar son: η_{cb-I_s} , c_{cb-a1} , c_{cb-e1} , c_{cb-e2} , c_{cb-e3} y F_{cb-sk} .
- e. Calibración del modelo de temperatura del aire. Los parámetros que se requieren estimar son: c_{s1-a1} , c_{s1-a2} , c_{fil1} , c_{fil2} y C_w . Los parámetros estimados en el paso anterior fueron utilizados para estimar los parámetros del modelo de temperatura.
- f. Calibración del modelo de humedad. Se requiere estimar sólo un parámetro: c_{Rn} . Los parámetros estimados para el modelo de temperatura de cubierta y para el modelo de temperatura del aire fueron utilizados para estimar el parámetro en este último paso.

Los valores estimados de los parámetros resultado de la calibración del modelo se muestran en el Cuadro 4.1. En el Cuadro 4.2 se muestran los índices estadísticos de los resultados obtenidos de la simulación del modelo después de realizar la calibra-

ción del modelo de simulación del invernadero. Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran los resultados obtenidos de la simulación de tres días de las variables de estado después de la calibración.

Cuadro 4.1: Valores nominales y estimados de los parámetros seleccionados del modelo de simulación con los métodos Evolución Diferencial y CMA-ES (3 al 5 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A.

Parámetro	Valor nominal	Valor calibrado con ED	Valor calibrado con CMA-ES
Temperatura de cubierta T_{cb}			
η_{cb-Is}	0.750	0.2992	0.2068
c_{cb-a1}	2.350	3.0815	1.5373
c_{cb-e1}	0.500	3.3627	1.9756
c_{cb-e2}	2.350	2.3738	1.7974
c_{cb-e3}	0.500	0.3941	0.3822
F_{cb-sk}	0.860	0.9900	0.9900
Temperatura del aire T_a			
c_{s1-a1}	1.8600	7.5000	3.2147
c_{s1-a2}	1.8600	7.5000	7.5000
c_{fil1}	2.085×10^{-3}	8.361×10^{-3}	8.361×10^{-3}
c_{filt2}	2.085×10^{-5}	2.500×10^{-3}	2.500×10^{-3}
C_w	0.1400	0.0826	0.1228
Humedad absoluta del aire C_{a-H2O}			
c_{Rn}	0.8600	0.9800	0.9800

De estos resultados puede observarse que después de la calibración el modelo del invernadero da una buena descripción del comportamiento dinámico del invernadero. De acuerdo con el índice d , las variables temperaturas de la cubierta T_{cb} y temperatura del suelo T_{s1} son muy bien descritas por el modelo. En cambio, la variable temperaturas del aire T_a y humedad absoluta del aire C_{a-H2O} presenta un ajuste más pobre. La variable temperatura del aire presenta una descripción aceptable durante el periodo nocturno, pero el modelo subestima la temperatura de manera sistemática durante el periodo diurno. Para la variable humedad absoluta del aire la predicción es menos buena comparado con las variables temperatura del

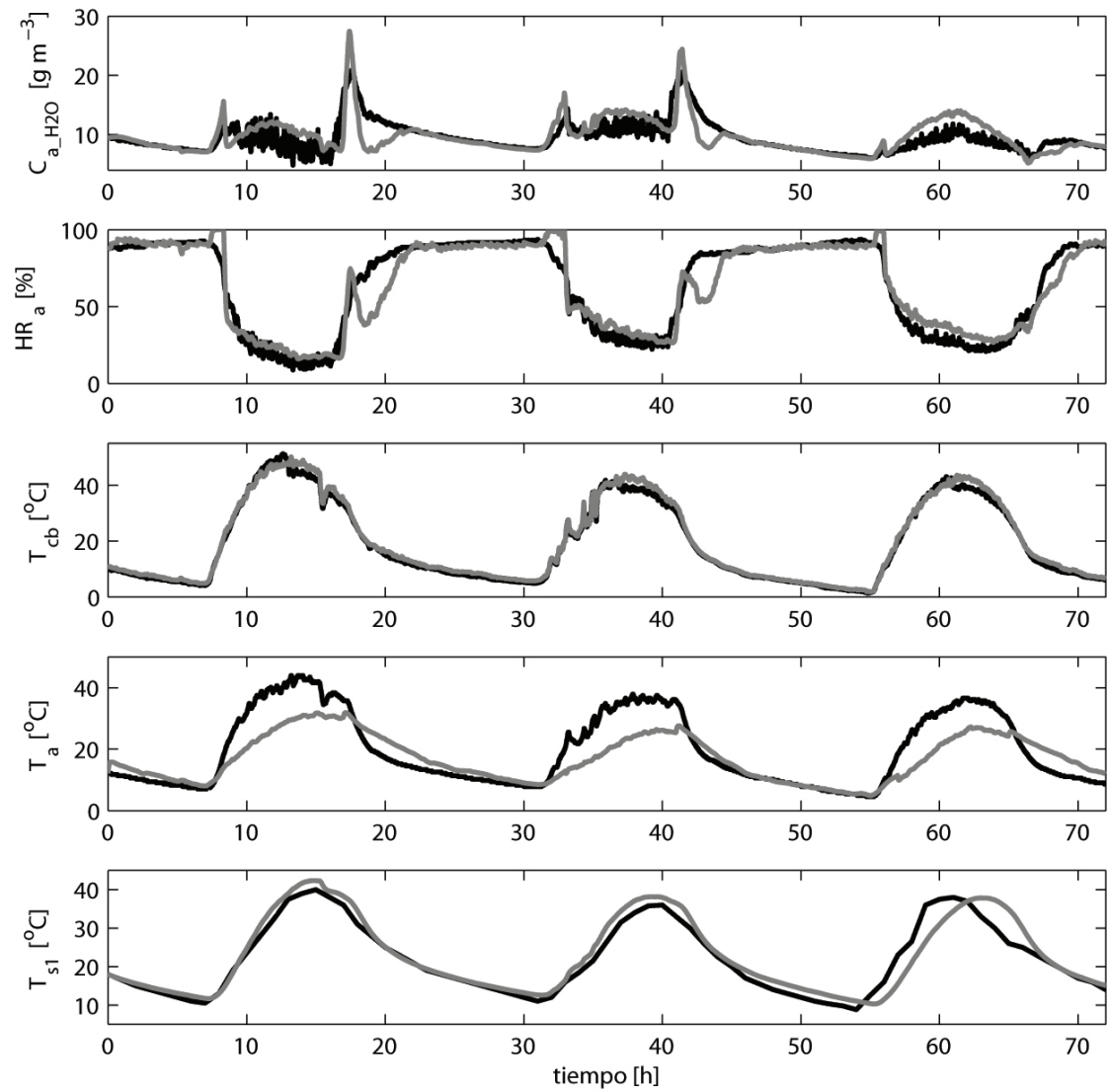


Figura 4.3: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura de cubierta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo de simulación con el algoritmo DE (3 al 5 de marzo de 2007).

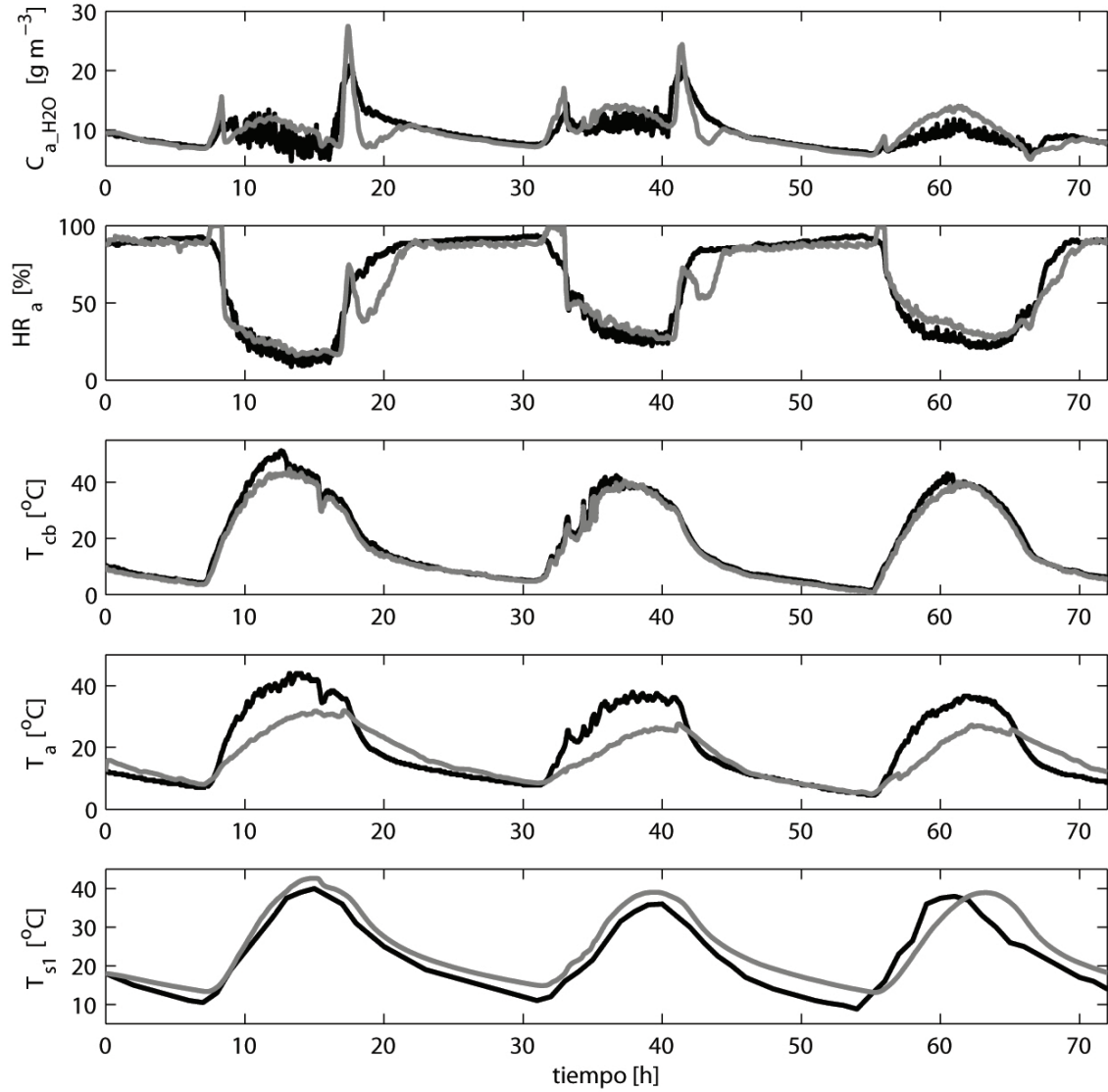


Figura 4.4: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura de cubierta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo de simulación con el algoritmo CMA-ES (3 al 5 de marzo de 2007).

Cuadro 4.2: Ecuaciones de regresión lineal y valores de los índices estadísticos resultado del proceso de calibración del modelo para simulación del invernadero (3 al 5 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A

Variable	Ecuación de regresión	r^2	$RMSE$	MAE	d
ED					
C_{a,H_2O}	$y = 0.8008x + 2.1534$	0.5102	2.0885	1.3889	0.8386
HR_a	$y = 0.8912x + 6.5775$	0.8972	9.3635	6.2278	0.9722
T_a	$y = 0.5486x + 6.3246$	0.7623	6.8432	5.2353	0.8677
T_{cb}	$y = 1.0105x + 0.6779$	0.9930	1.4949	1.1518	0.9973
T_{s1}	$y = 1.0124x + 0.7241$	0.9272	2.9296	2.1175	0.9749
CMA-ES					
C_{a,H_2O}	$y = 0.8136x + 1.9685$	0.5132	2.0922	1.4244	0.8401
HR_a	$y = 0.8702x + 7.2254$	0.8968	9.4843	6.6490	0.9709
T_a	$y = 0.4725x + 9.1031$	0.6660	7.7087	6.2249	0.8267
T_{cb}	$y = 1.0233x + 2.8329$	0.9469	4.5779	3.4556	0.9719
T_{s1}	$y = 0.9441x - 4.0650$	0.9057	3.9873	3.5998	0.9514

suelo y temperatura de la cubierta. Pero cuando la humedad del aire es expresada como humedad relativa, la evolución de la variable simulada por el modelo no se ajusta a las mediciones especialmente por la mañana y por la tarde, lo cual coincide con el periodo de apertura o cierre de las ventanas. Por tanto, es necesario hacer modificaciones al modelo de temperatura del aire para lograr un mejor ajuste y así el modelo pueda ser utilizado como simulador del clima del invernadero.

Los índices estadísticos del Cuadro 4.2 indican que los 2 métodos utilizados para la minimización del error son adecuados para la calibración del modelo dinámico no lineal del invernadero. En base a estos índices estadísticos, los métodos ED y CMA-ES mostraron un desempeño similar en el ajuste del modelo.

Para verificar la validez global de los valores de los parámetros estimados, éstos fueron usados en un conjunto de datos distinto a los usados en la calibración del modelo (del 27 de febrero al 1 de marzo de 2007). En el Cuadro 4.3 se muestran los índices estadísticos de los resultados obtenidos de la simulación del modelo del

invernadero. Las Figuras 4.5 y 4.6 se muestran los resultados obtenidos de la simulación de las variables de estado. De estos resultados, puede observarse que las simulaciones del modelo del invernadero, las variables temperatura de la cubierta y del suelo da un buen ajuste con las mediciones. La variable humedad absoluta del aire C_{a_H2O} y temperatura del aire no presentan un buen ajuste. La temperatura del aire es subestimado durante el día en todo el periodo de validación. Cuando la humedad del aire se expresa como humedad relativa, el modelo describe la dinámica mucho mejor que cuando se expresa como humedad absoluta.

Para mejorar el ajuste del modelo del invernadero, es necesario la calibración por separado de los procesos de ventilación natural y la transpiración del cultivo, procesos que influyen de manera importante en la evolución de la temperatura y humedad del aire. Posiblemente el modelo sea muy sensible a algún parámetro que no fue considerado en su calibración, lo que ocasiona que la temperatura no tenga un buen ajuste. Por esto, es recomendable realizar de manera formal el análisis de sensibilidad del modelo para seleccionar un nuevo conjunto de parámetros a estimar.

4.2. MODELO SIMPLIFICADO PARA CONTROL DEL CLIMA DEL INVERNADERO

El modelo se implementó en el ambiente MATLAB/SIMULINK. Este consta de un programa principal donde se definen los parámetros, las variables de entrada del modelo y las opciones de simulación; y un archivo C-MEX S-function donde se implementan las ecuaciones del modelo que es llamado por el programa principal a través de una archivo mdl de SIMULINK. Para obtener la solución numérica del modelo se utilizó el método de integración Runge-Kutta de cuarto orden con tamaño de paso de integración variable `ode45` con una tolerancia relativa de 1×10^{-8} . El intervalo de tiempo de integración del modelo fue de 1 minuto.

El modelo del invernadero para propósitos de control del clima descrito en la sección 3.4 fue desarrollado para su uso en el contexto de control predictivo no lineal.

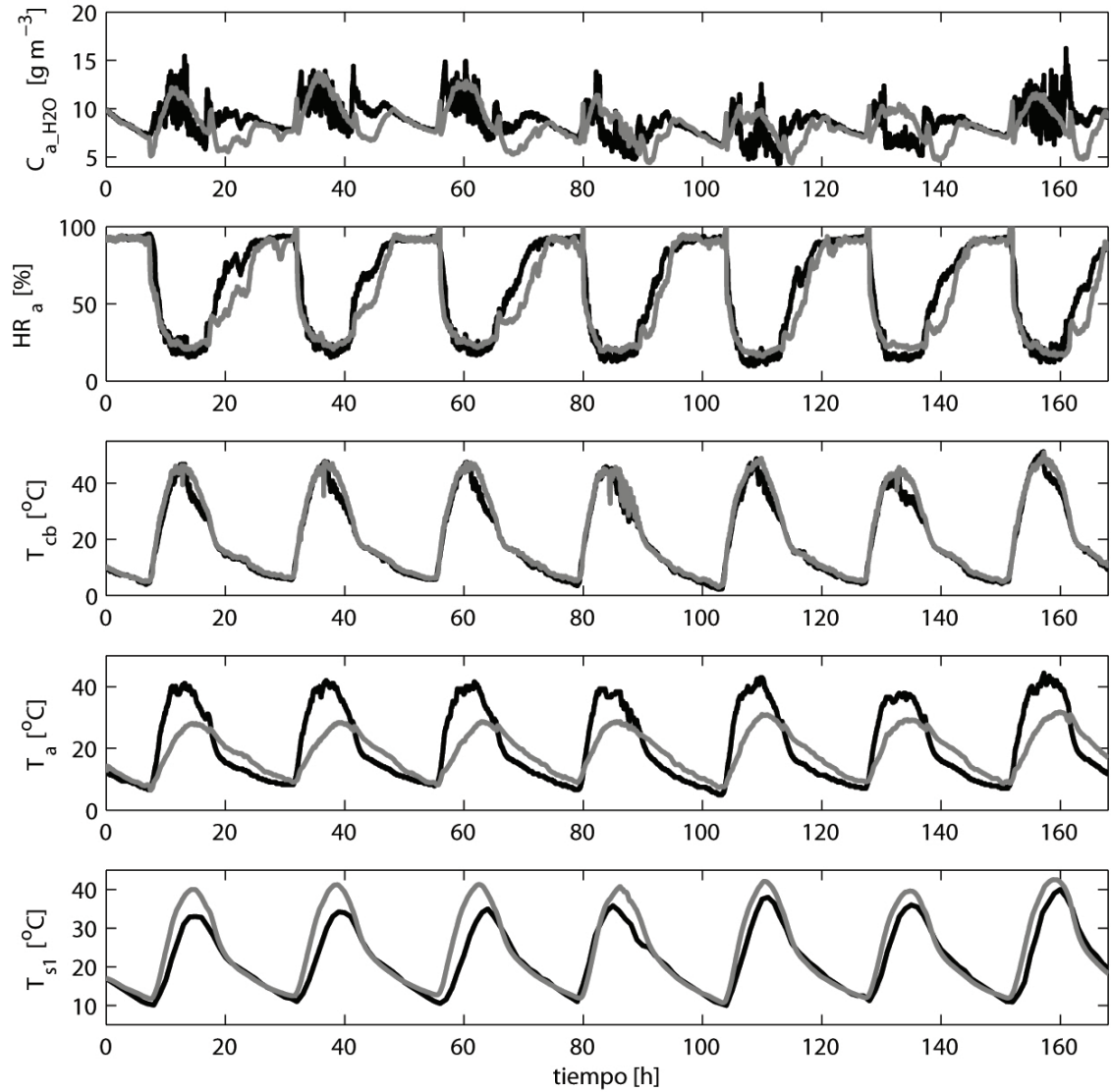


Figura 4.5: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura de cubierta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo de simulación con el algoritmo Evolución Diferencial (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).

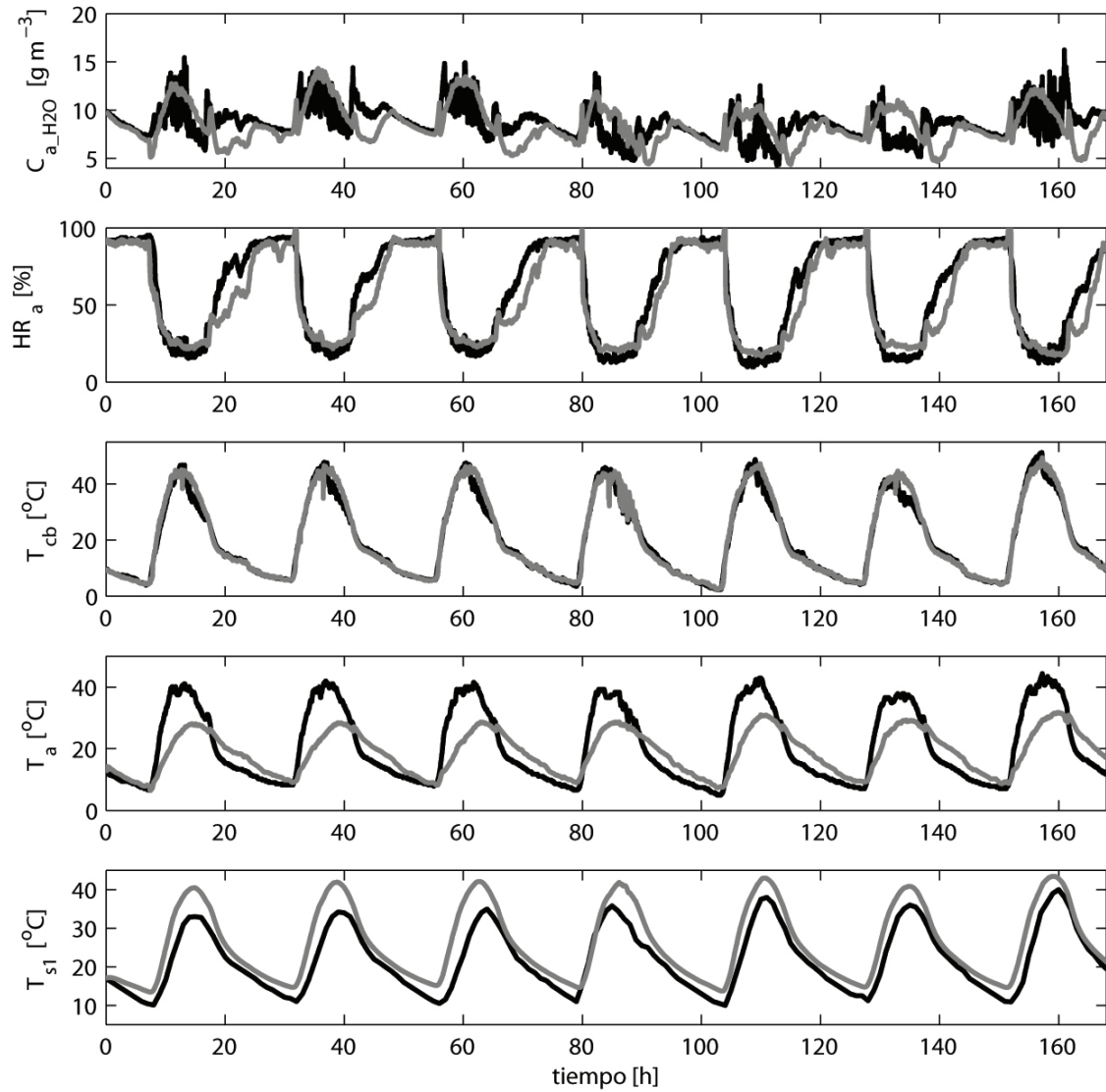


Figura 4.6: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura de cubierta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo de simulación con el algoritmo CMA-ES (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).

Cuadro 4.3: Ecuaciones de regresión lineal y valores de los índices estadísticos resultado del proceso de validación del modelo de simulación del invernadero (del 27 de febrero al 1 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A

Variable	Ecuación de regresión	r^2	$RMSE$	MAE	d
ED					
$C_{a,H2O}$	$y = 0.4513x + 4.3636$	0.1627	1.8943	1.4196	0.6319
HR	$y = 0.8912x + 6.5775$	0.8971	9.3509	6.2278	0.9722
T_a	$y = 0.4722x + 9.1067$	0.6650	7.7156	6.2282	0.8264
T_{cb}	$y = 1.0547x + 0.2724$	0.9834	2.4392	1.5729	0.9925
T_s	$y = 1.1411x - 0.8598$	0.8932	4.0983	2.7535	0.9488
CMA-ES					
$C_{a,H2O}$	$y = 0.4846x + 4.1951$	0.1503	1.9930	1.5168	0.6304
HR	$y = 0.8690x + 3.0285$	0.8972	10.9947	7.9591	0.9652
T_a	$y = 0.4725x + 9.1031$	0.6660	7.7087	6.2249	0.8267
T_{cb}	$y = 1.0394x - 0.4134$	0.9832	1.9562	1.2436	0.9951
T_s	$y = 1.0929x + 2.2914$	0.9187	5.1361	4.3412	0.9190

El horizonte de control de un control predictivo no lineal es de una hora (Tap, 2000), lo que significa que el modelo debe aproximar los datos medidos sobre un intervalo de tiempo de una hora. El comportamiento dinámico de la temperatura T_a y de la humedad $C_{a,H2O}$ del aire deben ser descritos de manera adecuada.

El modelo es validado mediante la simulación del modelo del invernadero con entradas de control conocidas u y entradas externas conocidas w . Los datos simulados resultantes fueron comparados con los datos medidos. Se encontró que las predicciones del modelo se aproximan bastante bien con los datos medidos en algunos días, pero en forma muy pobre en otros días. Para mejorar el modelo, se realizó una estimación de parámetros.

Para estimar los parámetros seleccionados, los estados medidos (T_a y $C_{a,H2O}$) fueron comparados con los estados simulados. Los parámetros fueron ajustados con datos de tres días, del 3 al 5 de marzo de 2007. Los valores iniciales de los estados se basaron en los datos medidos. La entradas externas se muestran en la Figura (4.7)

y las variables de control en la Figura (4.2).

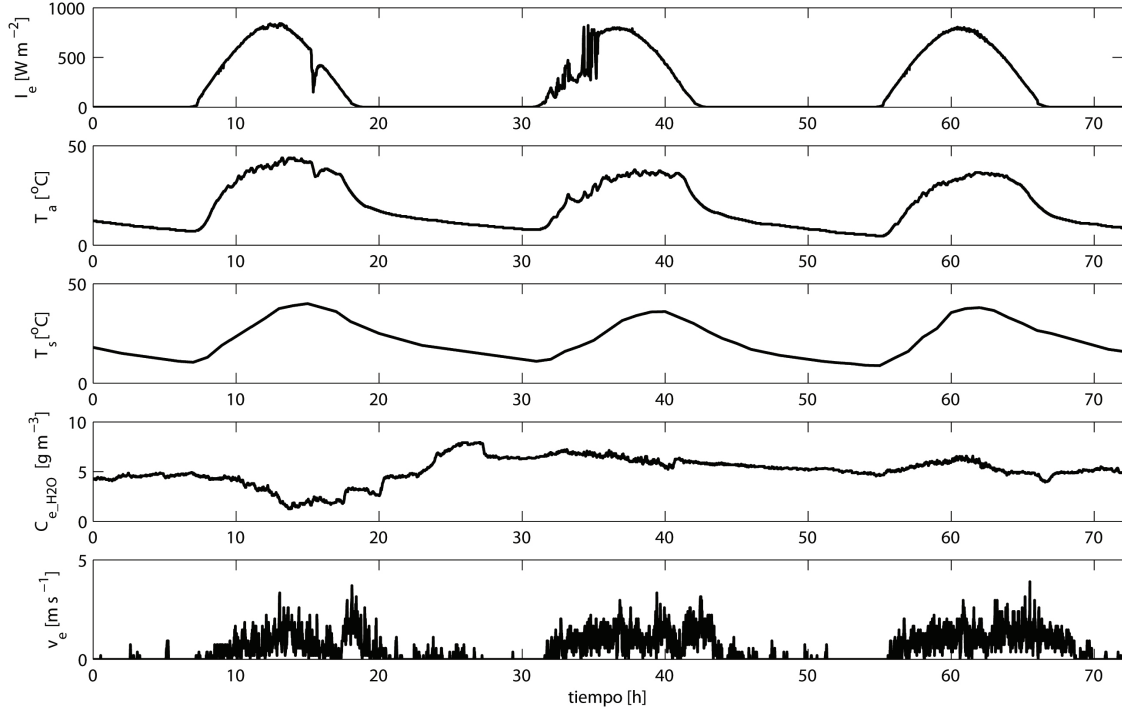


Figura 4.7: Entradas externas w utilizados en la calibración del modelo para control (3 al 5 de marzo de 2007), datos colectados en Chapingo, México.

Para ajustar los parámetros se utilizaron 3 métodos: a) mínimos cuadrados no lineales, utilizando la función `lsqnonlin` de MATLAB; b) evolución diferencial (ED) y c) estrategias evolutivas con matriz de covarianza (CMA-ES). En evolución diferencial se utilizó la estrategia “DE/rand/1/bin”, probabilidad de cruzamiento $CR = 0.5$, factor de variación diferencial $F = 0.9$, tamaño de la población $NP = 50$, precisión de convergencia de la población 1×10^{-5} y número máximo de generaciones de 250. En CMA-ES se utilizó un tamaño de población $NP = 50$, precisión de convergencia de la población 1×10^{-5} y número máximo de generaciones de 250. En el Cuadro 4.4 se muestran los valores nominales de los parámetros utilizados para la calibración del modelo.

El error a ser minimizado (mínimos cuadrados) se define como:

$$J = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^M (\hat{y}_h(t_i, p) - y_h(t_i))^2 \quad (4.4)$$

$$p^* = \arg \min J(p) \quad (4.5)$$

donde $L = 2$ es el número de salidas, $M = 4320$ es el número de observaciones, $\hat{y}_h(t_i, p)$ es la salida simulada y_h en el tiempo t_i , $y_h(t_i)$ en la medición y_h en el tiempo t_i . Las salidas son: $y_1 = T_a$ la temperatura del aire y $y_2 = C_{a_H2O}$ la humedad absoluta del aire. El conjunto de parámetros de calibración p del modelo:

$$p = [\eta_a \ \eta_s \ c_{a-e1} \ c_{a-e2} \ c_{cb-a1} \ c_{fil1} \ c_{Rn} \ c_{s-a1} \ C_w \ dx_{s-sub}] \quad (4.6)$$

y p^* son los parámetros que minimizan $J(p)$.

Los valores de los parámetros que fueron obtenidos de la calibración del modelo se dan en el Cuadro 4.4. En el Cuadro 4.5 se muestran los índices estadísticos de los resultados obtenidos de la simulación del modelo después de realizar la calibración de los parámetros del modelo del invernadero. Las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 muestran los resultados obtenidos de la simulación de tres días de las variables de estado después de la calibración.

De estos resultados puede observarse que después de la calibración el modelo del invernadero da una buena descripción del comportamiento dinámico del invernadero. Las variables temperaturas del aire T_a y del suelo T_s son bien descritas por el modelo. La variable humedad absoluta del aire C_{a_H2O} presenta un ajuste menos bueno. Aunque el comportamiento dinámico es aceptable, existen desviaciones durante el periodo nocturno. La humedad del aire influye en la tasa de transpiración del cultivo (la principal fuente de humedad dentro del invernadero), que se presenta mayormente en los periodos diurnos con alta irradiancia solar, y aunque no es completamente nulo, es muy baja en el periodo nocturno. Como el volumen de riego depende principalmente de la transpiración del cultivo, es necesario mejorar el modelado de esta variable.

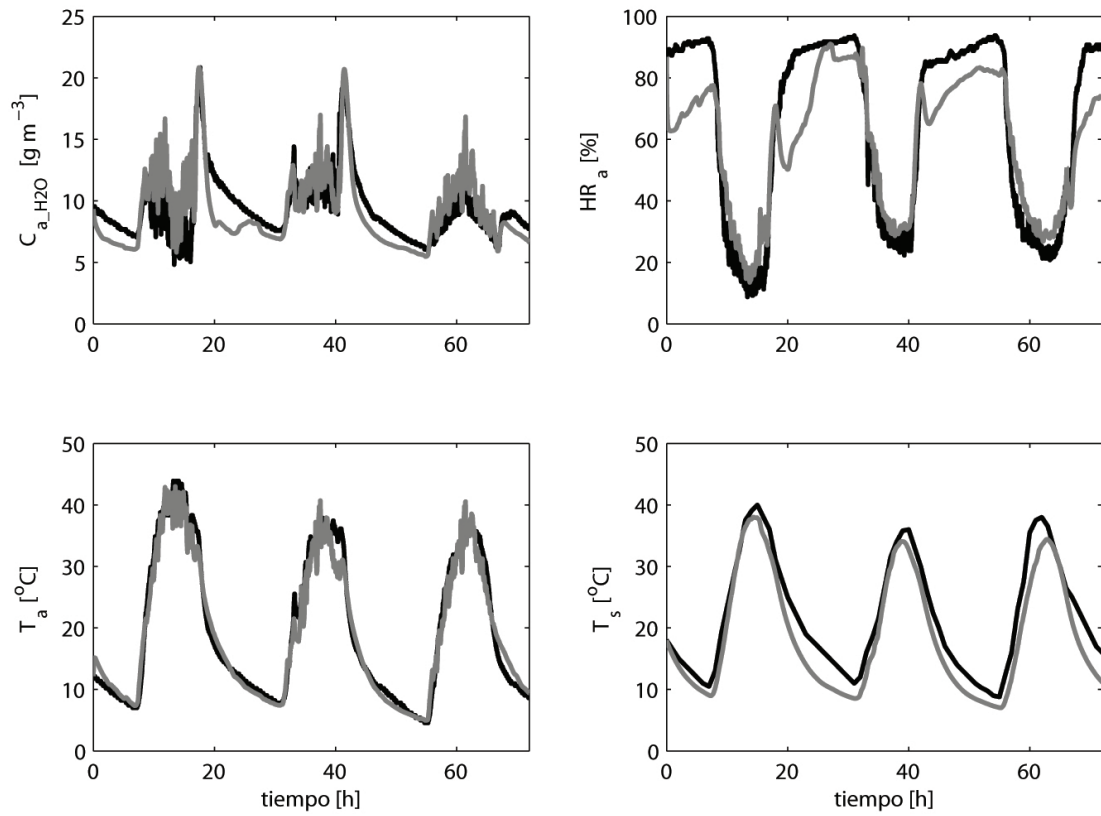


Figura 4.8: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo para control con la función `lsqnonlin` (3 al 5 de marzo de 2007).

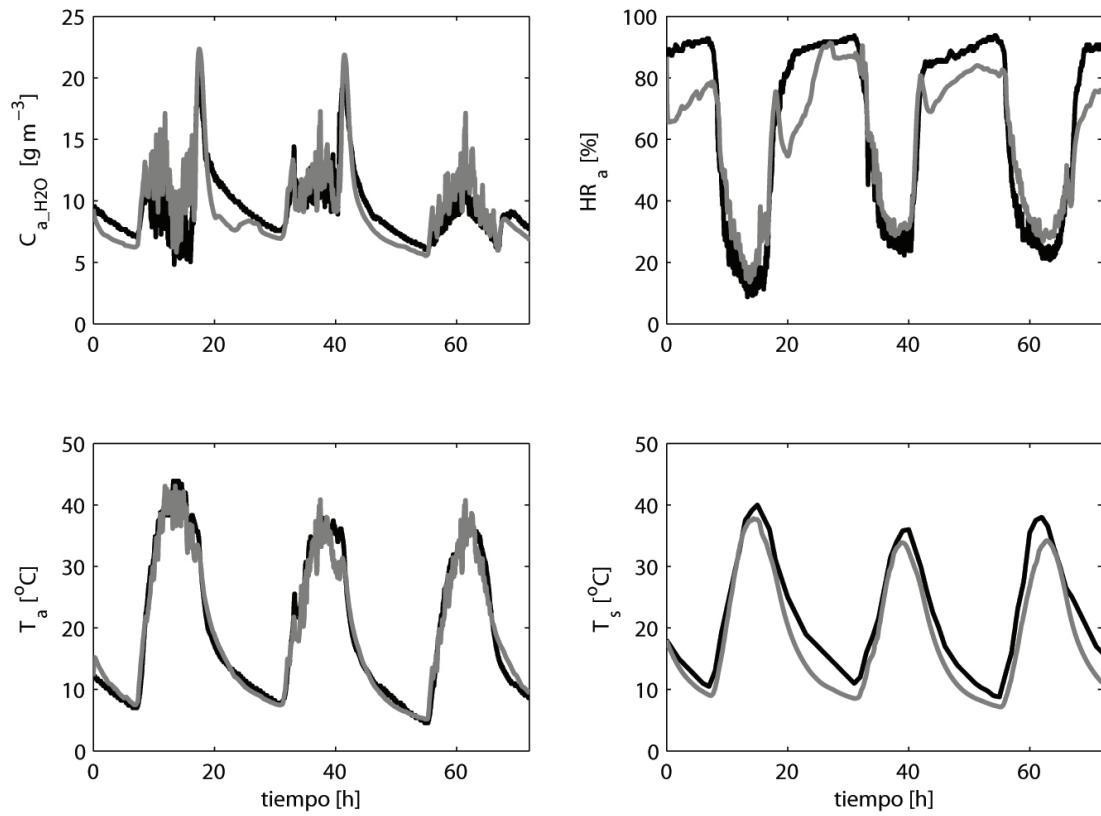


Figura 4.9: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo para control con el algoritmo Evolución Diferencial (3 al 5 de marzo de 2007).

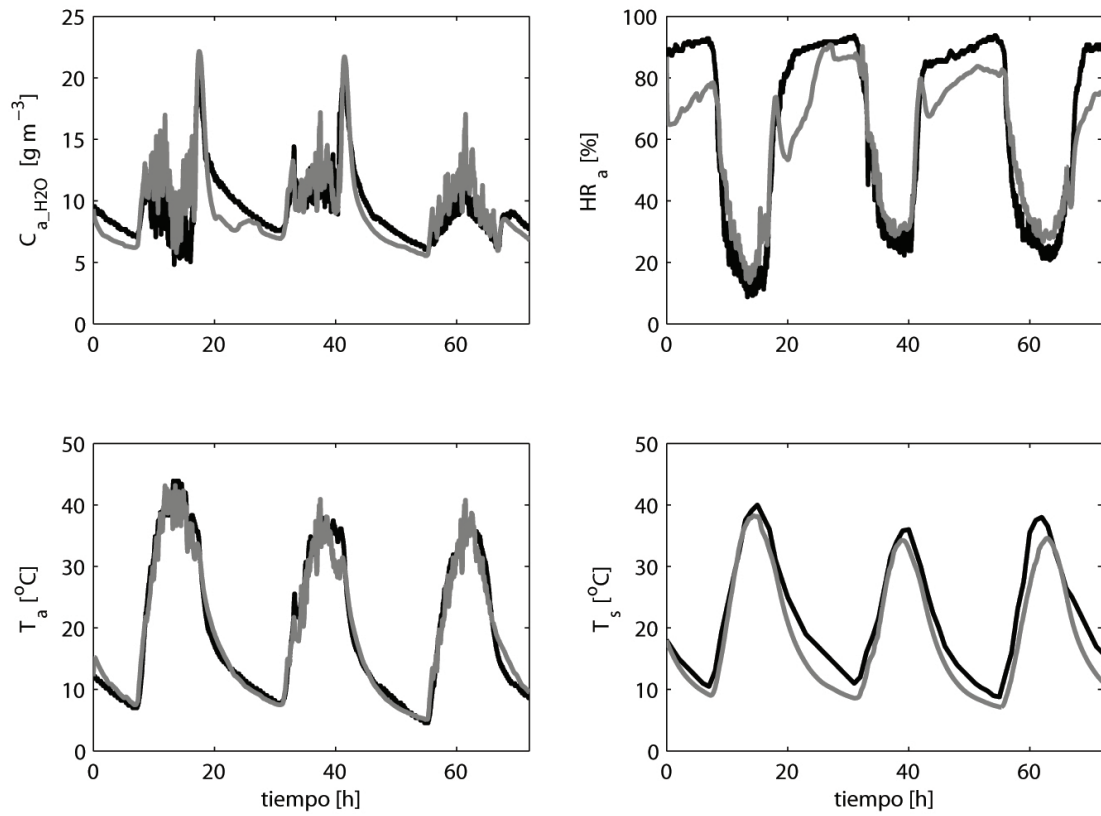


Figura 4.10: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) después de la calibración del modelo para control con el algoritmo CMA-ES (3 al 5 de marzo de 2007).

Cuadro 4.4: Valores nominales y estimados de los parámetros del modelo para control del invernadero, usando la función `lsqnonlin`, Evolución Diferencial y CMA-ES (3 al 5 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A.

Parámetro	Valor nominal	Valor calibrado con <code>lsqnonlin</code>	Valor calibrado con ED	Valor calibrado con CMA-ES
η_a	0.750	0.990	0.990	0.990
η_s	0.185	0.365	0.365	0.365
c_{a-e1}	2.350	0.950	0.950	0.950
c_{a-e2}	0.500	0.250	0.250	0.250
c_{cb-a1}	0.750	0.550	1.900	1.812
c_{fil1}	2.050×10^{-3}	2.500×10^{-3}	2.085×10^{-3}	2.185×10^{-3}
c_{Rn}	0.860	0.100	0.100	0.100
c_{s-a1}	1.860	7.500	7.500	7.500
C_w	0.120	0.140	0.144	0.146
dx_{s-sub}	0.725	0.200	0.1936	0.203

De los parámetros estimados, es de destacar que para c_{Rn} se encontró un valor muy bajo comparado con el valor de 0.86 que reportan Bontsema y colaboradores (2007) para un cultivo de tomate. Una posible causa del bajo valor c_{Rn} es que el cultivo presentaba un severo ataque de mosquita blanca, lo cual haya causado una disminución de la tasa de transpiración del cultivo. Los valores de los parámetros restantes se encuentran en el rango que se reporta en la literatura.

Los índices estadísticos del Cuadro 4.5 indican que los tres métodos utilizados para la minimización del error son adecuados para la calibración del modelo dinámico no lineal del invernadero. El ajuste del modelo calibrado con el método de mínimos cuadrados `lsqnonlin` de MATLAB, fue inferior comparado con el obtenido con los dos métodos globales ED y CMA-ES. Además, requiere una cuidadosa elección de los valores iniciales de los parámetros para lograr un buen ajuste. Los métodos ED y CMA-ES mostraron un desempeño similar en el ajuste del modelo. Una característica atractiva de CMA-ES es que para la minimización de la función del error, requiere que el usuario defina solamente un parámetro, el tamaño de la población.

Cuadro 4.5: Ecuaciones de regresión lineal y valores de los índices estadísticos resultado del proceso de calibración del modelo para control del invernadero (3 al 5 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A

Variable	Ecuación de regresión	r^2	$RMSE$	MAE	d
lsqnonlin					
$C_{a,H2O}$	$y = 0.8940x + 0.7662$	0.5796	1.9795	1.5505	0.8651
HR_a	$y = 0.6741x + 15.7661$	0.8675	13.3610	11.0960	0.9290
T_a	$y = 0.9159x + 1.1921$	0.9712	2.1333	1.5920	0.9909
T_s	$y = 1.1489x - 3.5878$	0.9547	1.6997	1.5839	0.8795
ED					
$C_{a,H2O}$	$y = 1.1795x - 2.4698$	0.7140	1.1734	1.1351	0.7184
HR_a	$y = 0.6971x + 0.9443$	0.8917	12.0617	10.2245	0.9427
T_a	$y = 0.9158x + 1.2755$	0.9708	2.1279	1.5886	0.9910
T_s	$y = 1.0028x - 3.2376$	0.9673	3.5969	3.1796	0.9631
CMA-ES					
$C_{a,H2O}$	$y = 0.9638x + 0.3067$	0.6176	1.9414	1.4972	0.8767
HR_a	$y = 0.6898x + 15.4693$	0.8857	12.4877	10.5258	0.9383
T_a	$y = 0.9148x + 1.3714$	0.9702	2.1387	1.6004	0.9909
T_s	$y = 1.0165x - 3.3131$	0.9685	3.3978	2.9669	0.9673

Para verificar la validez global de los valores de los parámetros, éstos fueron usados en un conjunto de datos distinto a los usados en la calibración del modelo (del 27 de febrero al 1 de marzo de 2007). En el Cuadro 4.6 se muestran los índices estadísticos de los resultados obtenidos de la simulación del modelo del invernadero. Las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestran los resultados obtenidos de la simulación de las variables de estado. De estos resultados, puede observarse que las simulaciones el modelo del invernadero da un ajuste aceptable con las mediciones. La variable humedad absoluta del aire $C_{a,H2O}$ presenta una desviación importante durante los periodos nocturnos, por lo que es necesario mejorar el submodelo de humedad.

En el modelo para propósitos de control la temperatura de la cubierta T_{cb} es una variable de entrada. Como esta variable generalmente no se mide, es necesario desarrollar una relación algebraica para estimarla, en función de las variables

meteorológicas que fácilmente estén disponibles.

Cuadro 4.6: Ecuaciones de regresión lineal y valores de los índices estadísticos resultado del proceso de validación del modelo para control del invernadero (del 27 de febrero al 1 de marzo de 2007). La descripción de los parámetros está en el apéndice A

Variable	Ecuación de regresión	r^2	$RMSE$	MAE	d
lsqnonlin					
$C_{a_{H_2O}}$	$y = 0.9362x - 0.2514$	0.3913	2.0323	1.6959	0.7281
HR	$y = 0.6660x + 12.1800$	0.8745	14.9813	12.5180	0.9195
T_a	$y = 0.8546x + 2.0248$	0.9736	2.6168	1.8051	0.9862
T_s	$y = 1.0667x - 3.9924$	0.8707	4.2607	3.7974	0.9413
ED					
$C_{a_{H_2O}}$	$y = 0.9612x - 0.2415$	0.3813	2.0387	1.6473	0.7305
HR	$y = 0.6947x + 12.1696$	0.8795	13.6585	11.4469	0.9345
T_a	$y = 0.8558x + 1.9973$	0.9736	2.6126	1.7924	0.9863
T_s	$y = 1.0544x - 3.8506$	0.8647	4.3653	3.8893	0.9380
CMA-ES					
$C_{a_{H_2O}}$	$y = 0.9542x - 0.2228$	0.3817	2.0361	1.6540	0.7300
HR	$y = 0.6867x + 12.0594$	0.8787	14.0522	11.7643	0.9303
T_a	$y = 0.8534x + 2.1351$	0.9724	2.6212	1.8322	0.9862
T_s	$y = 1.0712x - 3.9701$	0.8714	4.1979	3.7449	0.9431

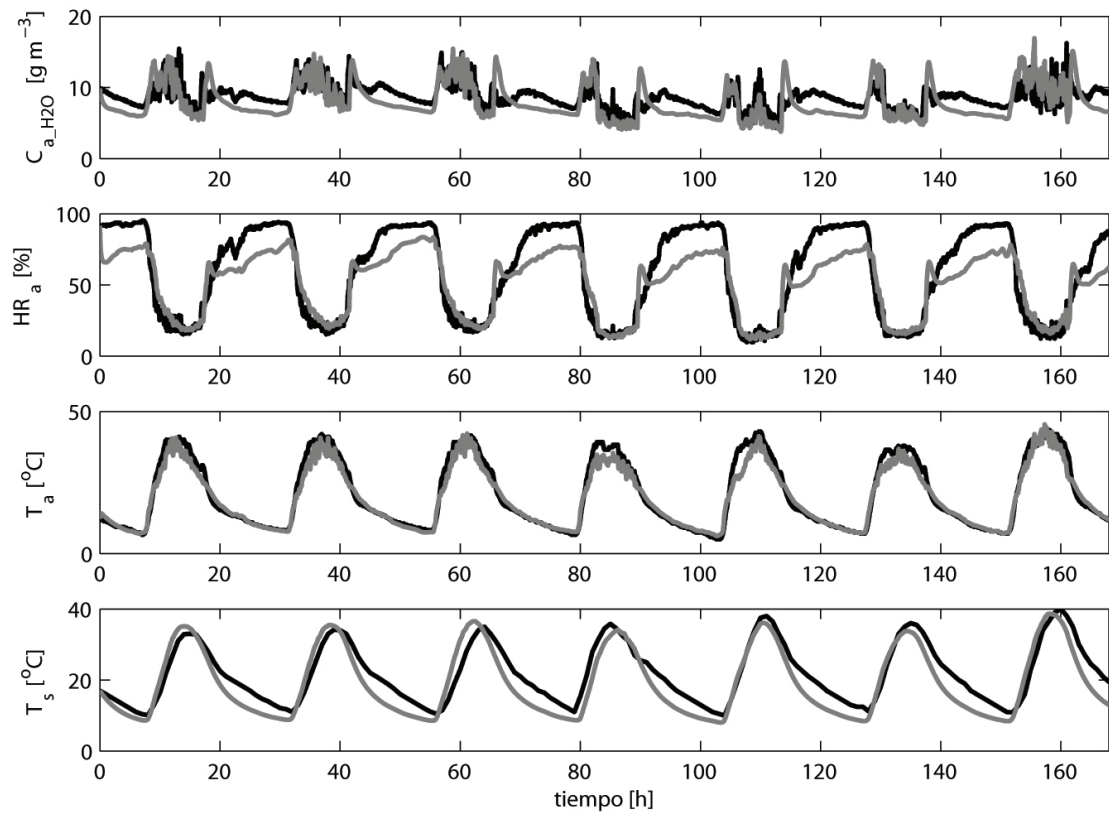


Figura 4.11: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo para control con la función `lsqnonlin` (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).

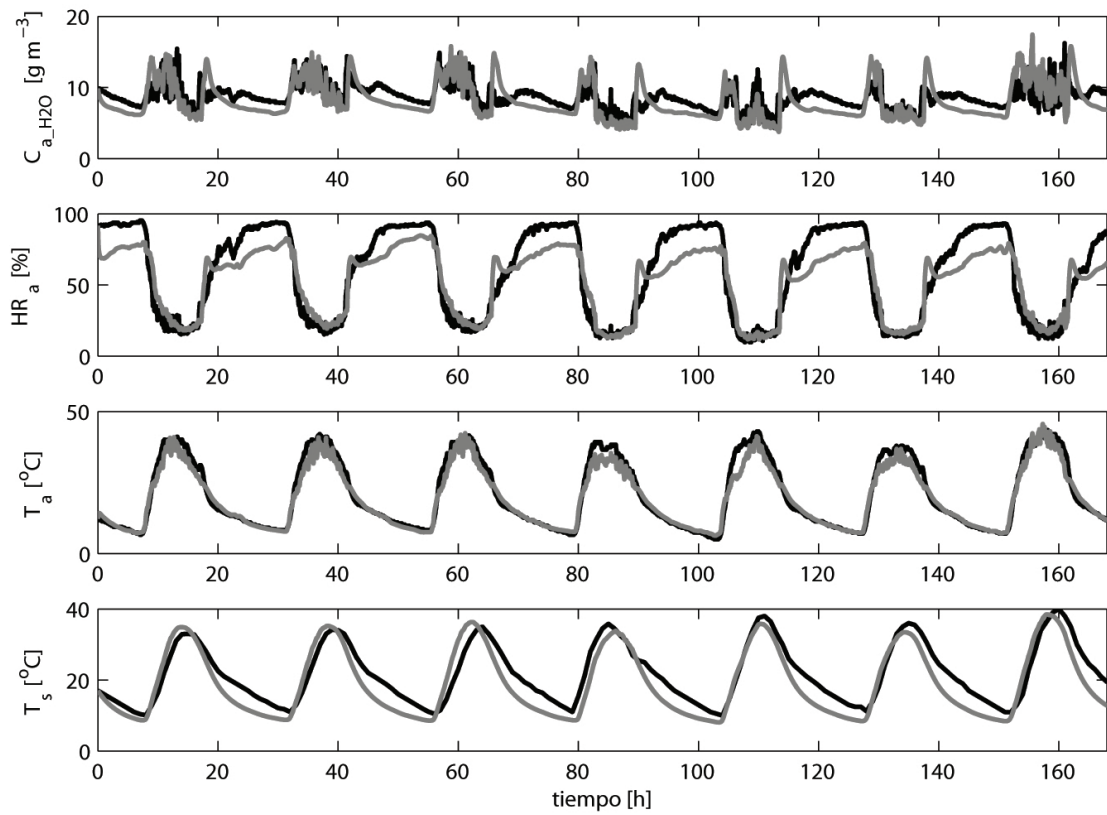


Figura 4.12: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo para control con el algoritmo Evolución Diferencial (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).

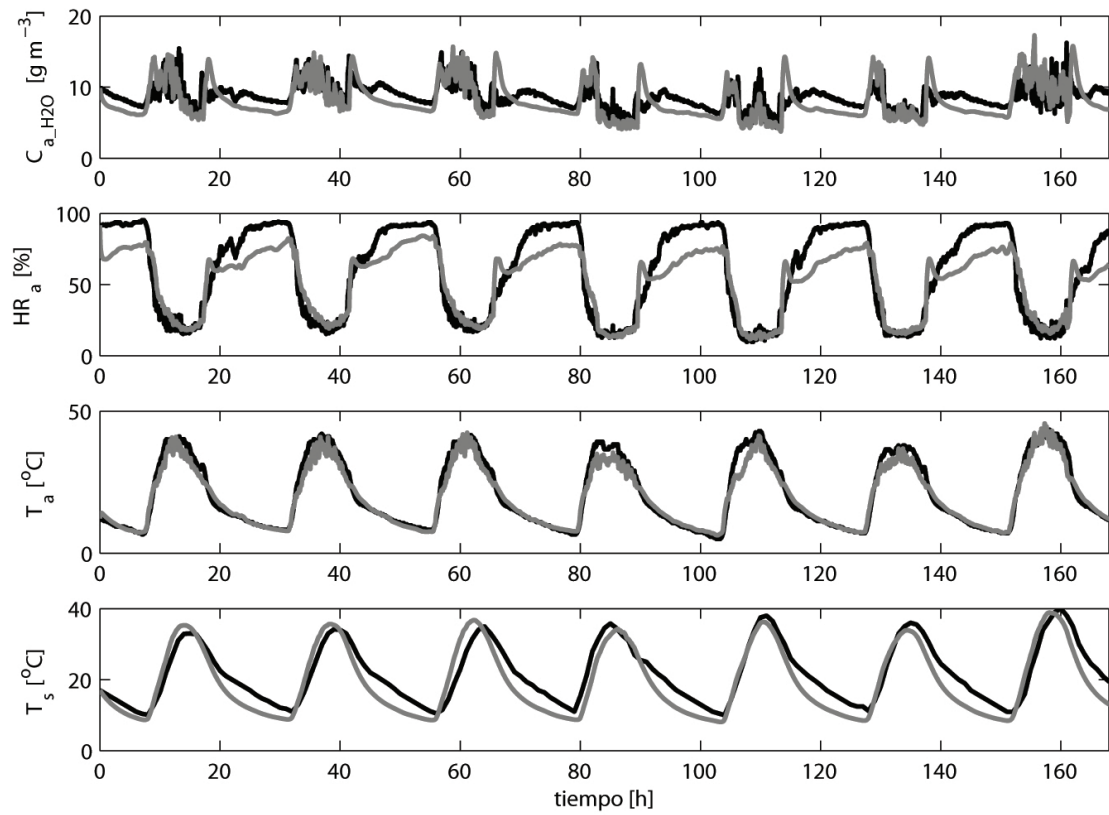


Figura 4.13: Variables de estado x (humedad absoluta, temperatura del aire y temperatura del suelo) medidos (negro) y simulados (gris) en la validación del modelo para control con el algoritmo CMA-ES (23 de febrero al 1 de marzo de 2007).

Capítulo 5

CONCLUSIONES

En la presente investigación se desarrollaron dos modelos dinámicos no lineales del clima de un invernadero. Un modelo de simulación que describe el comportamiento de las variables contenido de humedad y temperatura del aire, temperatura de la cubierta y temperatura de varias capas del suelo. Además otro modelo simplificado para propósitos de control, que describe las variables contenido de humedad y temperatura del aire.

Después de la calibración, el modelo detallado para propósitos de simulación del clima del invernadero, describe de manera adecuada el comportamiento dinámico del invernadero con ventilación natural y por lo tanto puede utilizarse para el estudio de estrategias de manejo para mejorar el ambiente de un invernadero, así como para aumentar el rendimiento y calidad de la cosecha. De acuerdo con el índice de concordancia d , las variables temperaturas de la cubierta y del suelo son bien descritas por el modelo, mientras que la variable humedad absoluta y temperatura del aire presenta un menor ajuste. Aunque el comportamiento dinámico es aceptable de la humedad absoluta del aire, existen desviaciones importantes, por lo que se requiere mejorar la descripción matemática de los procesos incluidos en el submodelo de humedad, especialmente de la transpiración del cultivo y la ventilación natural. El modelo subestima la temperatura durante el día, lo que influye en el bajo ajuste de la humedad del aire.

Los índices estadísticos de la calibración indican que los algoritmos Evolución Diferencial y Estrategias Evolutivas con matriz de covarianza tuvieron un desempeño similar en converger a un aparente óptimo global para el problema de la estimación de parámetros del modelo dinámico no lineal del clima del invernadero. Por tanto,

los dos algoritmos son una alternativa a los métodos locales para abordar el problema de la estimación de parámetros de modelos dinámicos no lineales del clima de invernaderos.

Para mejorar la calidad predictiva del modelo del invernadero, es recomendable realizar la calibración del modelo con datos de periodos contrastantes (verano e invierno) y con diferentes estados del cultivo. Un mejoramiento del modelo de ventilación, puede mejorar el comportamiento de las variables de estado.

Después de la calibración, el modelo simplificado para propósitos de control del clima del invernadero, describen de manera adecuada el comportamiento dinámico del invernadero, por lo que puede utilizarse en el diseño de sistemas de control para mejorar el ambiente del invernadero. De acuerdo con el índice de concordancia d , las variables temperaturas del aire y del suelo son bien descritas por el modelo, mientras que la variable humedad absoluta del aire presenta un menor ajuste. Aunque el comportamiento dinámico es aceptable de la humedad absoluta del aire, existen desviaciones durante el periodo nocturno, por lo que se requiere mejorar la descripción matemática de los procesos incluidos en el submodelo de humedad, especialmente de la transpiración del cultivo y la ventilación natural.

Los índices estadísticos de la calibración indican que los algoritmos Evolución Diferencial y Estrategias Evolutivas con matriz de covarianza, fueron mucho mejor en converger a un aparente óptimo global para el problema de la estimación de parámetros del modelo dinámico no lineal del clima del invernadero. Así también se obtuvo un mejor ajuste entre los datos simulados y los datos medidos de las tres variables de estado del modelo del invernadero. Por tanto, los algoritmos Evolución Diferencial y Estrategias Evolutivas con matriz de covarianza son una alternativa a los métodos locales para abordar el problema de la estimación de parámetros de modelos dinámicos no lineales del clima de invernaderos.

Los resultados mostraron que los modelos simulan de manera aceptable el clima del invernadero con ventilación natural y por lo tanto pueden utilizarse para el

estudio de estrategias de manejo y en el diseño de sistemas de control, para mejorar el ambiente de un invernadero.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez G., J., y J. Alvarez J. 1985. Modelado de procesos de fermentación, de destilación y de intercambiadores de calor. Informe Técnico No. 5. Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV.
- Bäck, T. 1996. Evolutionary algorithms in theory and practice. New York: Oxford University Press.
- Bailey, B. J. 1991. Climate modelling and control in greenhouses. *In: Progress in agricultural physics and engineering*. J. Matthews (ed). CAB International.
- Bakker, J. C., G. P. A. Bot, H. Challa, and N. J. Van de Braak (ed). 1995. Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen Pers, The Netherlands. 296 p.
- Beyer, H. G., and H. P. Schwefel. 2002. Evolution strategies. A comprehensive introduction. *Natural Computing* 1: 3-52.
- Bot, G. P. A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Bontsema, J., J. Hemming, C. Stanghellini, P. de Visser, E. J. van Henten, J. Bouding, T. Rieswijk, and S. Nieboer. 2007. On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit. Report 451, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Boulard, T., and A. Baille. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agric. For. Meteorol.* 65: 145-157.

- Boulard, T., and A. Baille. 1995. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *J. Agric. Eng. Res.* 61: 37-48.
- Boulard, T., and S. Wang. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agric. For. Meteorol.* 100: 25-34.
- Castañeda-Miranda, R., E. Jr. Ventura-Ramos, R. del R. Peniche-Vera, y G. Herrera-Ruiz. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. *Agrociencia* 41: 317-335.
- Cook, R., and L. Calvin. 2005. Greenhouse tomatoes change the dynamics of the north american fresh tomato industry. *Economic Research Report 2, USDA.* 81 p.
- Demrati, H., T. Boulard, A. Bekkaoui, and L. Bouirden. 2001. Natural ventilation and microclimatic performance of a large-scale banana greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 80: 291-271.
- de Halleux, D. 1989. Dynamic model of heat and mass transfer in greenhouses: theoretical and experimental study. PhD Thesis, Gembloux, Belgium, 278 p.
- de Zwart, H. F. 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Fatnassi, H., T. Boulard, H. Demrati, L. Bouirden, and G. Sappe. 2002. Ventilation performance of a large Canarian type greenhouse equipped with insect-proof nets. *Biosystems Eng.* 82: 97-105.
- Fogel, L. J., Owens, A. J. and Walsh, M. J. 1966. Artificial intelligence through simulated evolution. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Garzoli, K.V., and Blackwell, J. 1981. Thermal analysis of australian greenhouses. *Acta Hort.* 115: 125-132.

- Hansen, N. 2006. The CMA Evolution Strategy: A Comparing Review. *In*: J.A. Lozano, P. Larrañaga, I. Inza and E. Bengoetxea (eds.). Towards a new evolutionary computation. Advances in estimation of distribution algorithms, Springer. pp. 75-102.
- Heuvelink, E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Impron, I., S. Hemming, G. P. A. Bot. 2007. Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouse in tropical lowland. *Biosystems Engineering* 98: 79-89.
- Jolliet, O. 1993. Modelling of water uptake, transpiration and humidity in greenhouses, and their effects on crops. *Acta Hort.* 328: 69-78.
- Jolliet, O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* 57: 23-37.
- Jolliet, O. 1999. The water cycle. *In*: Greenhouse ecosystems. G. Stanhill, and H. Z. Enoch (ed). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. pp 303-325.
- Katsoulas, N., T. Bartzanas, T. Boulard, M. Mermier, and C. Kittas. 2006. Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation. *Biosystems Eng.* 93: 427-436.
- Kittas, C., T. Boulard, and G. Papadakis. 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effect. *Trans. ASAE* 40: 415-425.
- Koza, J. R. 1989. Evolving programs using symbolic expressions. *In*: N. S. Sridharan (ed.) Proc. of the 11th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence. San Mateo, CA. Morgan Kaufmann, 768-774 pp.

- Koza, J. R. 1990. Genetic programming: a paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems. Tech. Rep. STAN-CS-90-1314, Department of Computer Science, Stanford University.
- Legates, D. R., and G. J. McCabe Jr. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35: 233-241.
- López L., R. 2008. Necesidades hídricas e índice de estrés hídrico en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma Chapingo.
- Lopez, J., and K. Shwedel. 2001. The mexican greenhouse vegetable industry. *Industry Note* 032, 5 p.
- Lopez C., I. L., A. Rojano A., W. Ojeda B. y R. Salazar M. 2007. ARX models for predicting greenhouse air temperature: a methodology. *Agrociencia* 41: 181-192.
- López C., I. L. 2005. Differential evolution algorithms: a matlab implementation. Reporte Interno. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. 8 p.
- Majdoubi, H., T. Boulard, A. Hanafi, A. Bekkaoui, H. Fatnassi, H. Demrati, M. Nya, and L. Bouirden. 2007. Natural ventilation performance of a large greenhouse equipped with insect screens. *Trans. ASABE* 50: 641-650.
- Moreno B., A. 2007. El enfoque sistémico y la ingeniería de sistemas. *In: Ingeniería de sistemas: un enfoque interdisciplinario*. J. Acosta F. (ed). Alfaomega. pp. 1-28.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. I, A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.

- Papadakis, G., M. Mermier, J. F. Meneses, and T. Boulard. 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *J. Agric. Eng. Res.* 63: 219-228.
- Prenger, J. J., R. P. Fynn, R. C. Hansen. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *Transactions of the ASABE.* 45: 1779-1788.
- Price, K. V. 1999. An introduction to differential evolution. *In: New Ideas in Optimization.* Corne, D., M. Dorigo, F. Glover, D. Dasgupta, P. Moscato, R. Poli and K. V. Price (eds). McGraw-Hill, London. pp 79-108.
- Price, K., R. Storn, and J. Lampinen. 2005. Differential evolution. A practical approach to global optimization. Springer.
- Rodríguez D., F. 2002. Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero. Tesis de Doctorado. Universidad de Almería.
- Romero, P., G. Giacomelli, C. Y. Choi, and I. López-Cruz. 2006. Ventilation rates for a naturally-ventilated greenhouse in central Mexico. *Acta Hort.* 719: 65-72.
- Roy, J. C., T. Boulard, C. Kittas, and S. Wang. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: The greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Eng.* 83: 1-20.
- Salisbury, F. B., and C. W. Ross. 1992. Plant physiology. 4th ed. Wadsworth Publishing.
- Schwefel, H. P. 1981. Numerical optimization of computer models. Chichester: John Wiley & Sons.
- Schwefel, H. P. 1995. Evolution and optimum seeking. New York: John Wiley & Sons.

- Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. PhD dissertation, Agricultural University, Wageningen, 150 p.
- Stanghellini, C.; and T. de Jong. 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agric. For. Meteorol.*, 76: 129-148.
- Storn, R. 2008. Differential evolution research - Trends and open questions. *In: Advances in differential evolution*. Chakraborty, U. K. (ed.). Springer. pp. 1-32.
- Storn, R., and K. V. Price. 1995. Differential evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Report TR-95-012, ICSI. <ftp://ftp.icsi.berkeley.edu/pub/techreports/1995/tr-95-012.ps.Z>
- Storn, R., and K. V. Price. 1997. Differential evolution. A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization* 11: 341-359.
- Takakura, T., K. A. Jordan, and L. L. Boyd. 1971. Dynamic simulation of plant growth and the environment in the greenhouse. *Trans. ASAE* 14: 964-971.
- Tap, F. 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Van Ooteghem, R. J. C. 2007. Optimal control design for a solar greenhouse. Ph.D. Thesis. Wageningen University, The Netherlands.
- Wang, S., and T. Boulard. 2000. Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a mediterranean climate. *J. Agric. Engng. Res.* 2000: 27-38.
- Willmott, C. J. 1981. On the validation of models. *Phys. Geogr.* 2: 184-194.
- Willmott, C. J., S. G. Ackleson, R. E. Davis, J. J. Feddema, K. M. Klink, D. R. Legates, J. O'Donnell, and C. M. Rowe. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.* 90: 8995-9005.

Yao, X. 2003. Evolutionary computation: a gentle introduction. *In*: Evolutionary optimization. Sarker, R., M. Mohammadian and X. Yao (eds). Kluwer Academic Publishers. pp 27-53.

Apéndice A

NOTACIÓN

Cuadro A.1: Símbolos y variables del modelo del clima del invernadero.

Símbolo	Descripción	Valor nominal	Unidades
α_{cb-a}	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie interior de la cubierta y el aire interior		$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
α_{cb-e}	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie exterior de la cubierta y el aire exterior		$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
α_{s1-a}	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire interior		$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
γ	Constante psicrométrica termodinámica	66.1	Pa K^{-1}
δ	Pendiente de la curva de presión de vapor a saturación		Pa K^{-1}
η_{cb-Is}	Coeficiente de absorción del material de la cubierta a la radiación solar		—
η_{s-Is}	Coeficiente de absorción de la capa superficial de suelo a la radiación solar		—
$\lambda_{(s1-s2)}$	Coeficiente de conducción de calor del suelo	1.5	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\lambda_{(s2-s3)}$	Coeficiente de conducción de calor del suelo	1.5	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\lambda_{(s3-s4)}$	Coeficiente de conducción de calor del suelo	1.5	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\lambda_{(s4-sub)}$	Coeficiente de conducción de calor del suelo	1.5	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ_a	Densidad del aire		kg m^{-3}
ρ_{cb}	Densidad del polietileno de la cubierta		kg m^{-3}
ρ_s	Densidad del suelo		kg m^{-3}
σ	Constante de Stefan–Boltzmann	5.67×10^{-8}	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
τ_{cb-Il}	Transmisividad de la cubierta del invernadero a la radiación térmica	0.68	—
τ_{cb-Is}	Transmisividad de la cubierta del invernadero a la radiación solar	0.81	—
τ_{cu-Il}	Transmisividad del cultivo a la radiación térmica		—
τ_{cu-Is}	Transmisividad del cultivo a la radiación solar		—
Φ_{a-e}	Flujo de ventilación		$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
A_s	Área de la superficie del suelo cubierto por el invernadero		m^2
A_{sec}	Área de la sección del invernadero perpendicular al flujo de ventilación		m^2
A_{cb}	Área de la superficie de la cubierta del invernadero		m^2
A_c	Área de ventanas cenital		m^2

Símbolo	Descripción	Valor nominal	Unidades
A_l	Área de ventanas lateral		m^2
c_{p-a}	Capacidad de calor específico del aire a presión constante	1010	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
c_{p-cb}	Capacidad de calor específico del polietileno de la cubierta		$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
c_{p-s}	Capacidad de calor específico del suelo		$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
c_{Rn1}	Coefficiente empírico		
$c_{cb-a1},$ c_{cb-a2}	Coefficientes empíricos		
$c_{cb-e1} -$ c_{cb-e4}	Coefficientes empíricos		
$c_{v_e, \lim\ env}$	Velocidad del aire donde se conmutan los modelos exponencial y lineal		$m\ s^{-1}$
$c_{s1-a1},$ c_{s1-a2}	Coefficientes empíricos		
C_w	Coefficiente de efecto de viento		—
C_d	Coefficiente de descarga	0.72	—
d_{cu}	Longitud característica de las hojas del cultivo	0.10	m
$d_{(s1)}$	Espesor de la primera capa de suelo	0.05	m
$d_{(s2)}$	Espesor de la segunda capa de suelo	0.10	m
$d_{(s3)}$	Espesor de la tercera capa de suelo	0.20	m
$d_{(s4)}$	Espesor de la cuarta capa de suelo	0.40	m
$dx_{(s1-s2)}$	Distancia entre los centros de la primera y segunda capas de suelo	0.075	m
$dx_{(s2-s3)}$	Distancia entre los centros de la segunda y tercera capas de suelo	0.15	m
$dx_{(s3-s4)}$	Distancia entre los centros de la tercera y cuarta capas de suelo	0.30	m
$dx_{(s4-sub)}$	Distancia entre los centros de la cuarta capa de suelo y el subsuelo	0.20	m
D_a	Déficit de saturación de vapor de agua del aire		Pa
E_{cb}	Coefficiente de emisividad de la cubierta		—
E_{cu}	Coefficiente de emisividad del cultivo		—
E_s	Coefficiente de emisividad del suelo		—
E_{sk}	Coefficiente de emisividad de la bóveda celeste		—
F_{cb-sk}	Factor de forma cubierta-bóveda celeste		—
F_{cb-cu}	Factor de forma superficie interior de la cubierta-cultivo		—
F_{s-cb}	Factor de forma superficie del suelo-superficie interior de la cubierta		—
F_{s-cu}	Factor de forma superficie del suelo-cultivo		—
g	Aceleración de la gravedad	9.81	$m\ s^{-2}$
I_e	Radiación global en el exterior		$W\ m^{-2}$
I_{sol}	Radiación solar que alcanza al cultivo		$W\ m^{-2}$
k_{a-cb}	Coefficiente de transferencia de masa de vapor de agua entre el aire interior y la superficie interior de la cubierta		$m\ s^{-1}$ $m\ s^{-1}$ $m\ s^{-1}$
k_{cu-II}	Coefficiente de extinción para radiación térmica del cultivo	0.64	—

Símbolo	Descripción	Valor nominal	Unidades
k_{cu-Is}	Coefficiente de extinción para radiación solar del cultivo	0.48	—
L	Calor latente de evaporación del agua	2.454×10^6	J kg^{-1}
LAI	Índice de área foliar		$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
Le	Número de Lewis para vapor de agua en aire	0.89	—
r_b	Resistencia aerodinámica		s m^{-1}
r_l	Resistencia estomática		s m^{-1}
R_n	Radiación neta que absorbe el cultivo		W m^{-2}
T_a	Temperatura del aire interior		K
T_e	Temperatura del aire exterior		K
T_o	Temperatura del aire interior a un nivel de referencia		K
T_{cb}	Temperatura de la cubierta		K
T_{cu}	Temperatura del cultivo		K
T_{s1}	Temperatura de la capa superficial de suelo		K
T_{s2}	Temperatura de la segunda capa de suelo		K
T_{s3}	Temperatura de la tercera capa de suelo		K
T_{sk}	Temperatura de la bóveda celeste		K
v_a	Velocidad del aire interior		m s^{-1}
v_e	Velocidad del aire exterior		m s^{-1}
V_a	Volumen que ocupa el aire del invernadero		m^3
V_{cb}	Volumen del material de la cubierta del invernadero		m^3
V_{s1}	Volumen de la capa superficial de suelo		m^3
V_{s2}	Volumen de la segunda capa de suelo		m^3
C_{a-H_2O}	Concentración de humedad del aire interior		kg m^{-3}
C_{e-H_2O}	Concentración de humedad del aire exterior		kg m^{-3}
$C_{a-H_2O}^*$	Concentración de humedad a saturación a la temperatura del aire interior		kg m^{-3}
$C_{cb-H_2O}^*$	Concentración de humedad a saturación a la temperatura de la cubierta		kg m^{-3}

Cuadro A.2: Flujos de masa [kg s^{-1}] del modelo del clima del invernadero.

Símbolo	Descripción	Unidades
$\Phi_{m(a-e)}$	Intercambio con el aire exterior por ventilación e infiltración	kg s^{-1}
$\Phi_{m(cb-a)}$	Condensación en la superficie interior de la cubierta	kg s^{-1}
$\Phi_{m(cb-e)}$	Condensación en la superficie exterior de la cubierta	kg s^{-1}
$\Phi_{m(cu-a)}$	Transpiración del cultivo	kg s^{-1}

Cuadro A.3: Flujos de calor [W] del modelo del clima del invernadero.

Símbolo	Descripción	Unidades
$Q_{env(cb-a)}$	Transferencia de calor por convección entre la superficie interior de la cubierta y el aire interior	W
$Q_{env(cb-e)}$	Transferencia de calor por convección entre la superficie exterior y el aire exterior	W

Cuadro A.3: Flujos de calor

Continuación ...

Símbolo	Descripción	Unidades
$Q_{cnv(s1-a)}$	Transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire interior	W
$Q_{cnd(s1-s2)}$	Conducción entre la capa superficial y segunda capa de suelo	W
$Q_{cnd(s2-s3)}$	Conducción entre la segunda y tercera capa de suelo	W
$Q_{ven(a-e)}$	Intercambio de calor latente con el aire exterior por ventilación natural e infiltración	W
$Q_{lt(cb)}$	Calor latente por condensación en la superficie interior de la cubierta	W
$Q_{lt(cu-a)}$	Calor latente por transpiración del cultivo	W
$Q_{rad(cb-sk)}$	Transferencia de calor neta por radiación entre la superficie exterior de la cubierta y la bóveda celeste	W
$Q_{rad(cb-cu)}$	Transferencia de calor neta por radiación entre la superficie interior de la cubierta y el cultivo	W
$Q_{rad(s1-cb)}$	Transferencia de calor neta por radiación entre la superficie del suelo y la superficie interior de la cubierta	W
$Q_{rad(s1-cu)}$	Transferencia de calor neta por radiación entre la superficie del suelo y el cultivo	W
$Q_{rad(s1-sk)}$	Transferencia de calor neta por radiación entre la superficie del suelo y la bóveda celeste	W
$Q_{sol(cb)}$	Radiación de onda corta absorbida por la cubierta	W
$Q_{sol(s1)}$	Radiación solar absorbido por la capa superficial de suelo	W

Apéndice B

IMPLEMENTACIÓN C-MEX S-FUNCTION DEL MODELO PARA SIMULACIÓN DEL CLIMA DEL INVERNADERO

```

1  /*-----*
2  * Modelo de Simulacion del Clima de un Invernadero *
3  * Tesis de Maestria de Agustin Ruiz Garcia *
4  * Posgrado IAUIA, Universidad Autonoma Chapingo *
5  * Chapingo Mex., Julio de 2008 *
6  * Revision: Octubre de 2008 *
7  *-----*/

8  #define S_FUNCTION_LEVEL 2
9  #define S_FUNCTION_NAME modelosim

10 #include "simstruc.h"
11 #include <math.h>

12 #define max(A,B) ((A) > (B) ? (A) : (B))
13 #define min(A,B) ((A) < (B) ? (A) : (B))
14 #define u(element)(*uPtrs[element])

15 double humrel(double Tx, double Cx_H2O);
16 double humedadabsolutasat(double Tx);
17 double pvsat(double Tx);
18 double pvact(double Tx, double Cx_H2O);

19 /*Used to read the parameter number 1*/
20 #define CaH2O0 p[0]
21 #define Ta0 p[1]
22 #define Tcb0 p[2]
23 #define Ts10 p[3]
24 #define Ts20 p[4]
25 #define Ts30 p[5]
26 #define Ts40 p[6]
27 #define VOLgrh p[7]
28 #define VOLcb p[8]
29 #define VOLs1 p[9]
30 #define VOLs2 p[10]
31 #define VOLs3 p[11]
32 #define VOLs4 p[12]
33 #define AREAs p[13]

```



```

34 #define AREAcb      p[14]
35 #define AREAfv      p[15]
36 #define Hvent       p[16]
37 #define LAI         p[17]
38 #define Dcu         p[18]
39 #define dx_s1s2      p[19]
40 #define dx_s2s3      p[20]
41 #define dx_s3s4      p[21]
42 #define dx_s4sub     p[22]
43 #define Tsub        p[23]
44 #define DENaire      p[24]
45 #define DENcb        p[25]
46 #define CPaire       p[26]
47 #define CPcb         p[27]
48 #define VHCs1        p[28]
49 #define VHCs2        p[29]
50 #define VHCs3        p[30]
51 #define VHCs4        p[31]
52 #define CONSTpsi     p[32]
53 #define CALORLAT     p[33]
54 #define CSBOLTZ      p[34]
55 #define HC_s         p[35]
56 #define k_cu_I1      p[36]
57 #define k_cu_Is      p[37]
58 #define COEFRncu     p[38]
59 #define ABScb_Is     p[39]
60 #define TRANScb_I1   p[40]
61 #define TRANScb_Is   p[41]
62 #define COEFcb_a1    p[42]
63 #define COEFcb_e1    p[43]
64 #define COEFcb_e2    p[44]
65 #define COEFcb_e3    p[45]
66 #define COEFs1_a1    p[46]
67 #define COEFs1_a2    p[47]
68 #define COEFCw       p[48]
69 #define COEFCd       p[49]
70 #define COEFinfla    p[50]
71 #define COEFinflb    p[51]
72 #define COEFmalla    p[52]
73 #define EMIsk        p[53]
74 #define EMIcb        p[54]
75 #define EMIs         p[55]
76 #define FFcb_sk      p[56]

77 /*=====
78  * S-function methods *
79  *=====*/

80 /* Function: mdlInitializeSizes =====
81  * Abstract:
82  *   The sizes information is used by Simulink to determine the S-function

```

```

83  *    block's characteristics (number of inputs, outputs, states, etc.).
84  */
85  static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
86  {
87      ssSetNumSFcnParams(S, 1); /* Number of expected parameters */
88      if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
89          /* Return if number of expected != number of actual parameters */
90          return;
91      }

92      ssSetNumContStates(S, 7);
93      ssSetNumDiscStates(S, 0);

94      if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
95      /*Entradas del modelo*/
96      ssSetInputPortWidth(S, 0, 7);

97      ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);

98      if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
99      ssSetOutputPortWidth(S, 0, 8);

100     ssSetNumSampleTimes(S, 1);
101     ssSetNumRWork(S, 0);
102     ssSetNumIWork(S, 0);
103     ssSetNumPWork(S, 0);
104     ssSetNumModes(S, 0);
105     ssSetNumNonsampledZCs(S, 0);

106     ssSetOptions(S, 0);
107 }

108 /* Function: mdlInitializeSampleTimes =====
109  * Abstract:
110  *    This function is used to specify the sample time(s) for your
111  *    S-function. You must register the same number of sample times as
112  *    specified in ssSetNumSampleTimes.
113  */
114  static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
115  {
116      ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
117      ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);

118  }

119  #define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS /* Change to #undef to remove function */
120  #if defined(MDL_INITIALIZE_CONDITIONS)
121      /* Function: mdlInitializeConditions =====
122       * Abstract:
123       *    In this function, you should initialize the continuous and discrete
124       *    states for your S-function block. The initial states are placed

```

```

125  *    in the state vector, ssGetContStates(S) or ssGetRealDiscStates(S).
126  *    You can also perform any other initialization activities that your
127  *    S-function may require. Note, this routine will be called at the
128  *    start of simulation and if it is present in an enabled subsystem
129  *    configured to reset states, it will be call when the enabled subsystem
130  *    restarts execution to reset the states.
131  */
132 static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
133 {
134     real_T *x0=ssGetContStates(S);
135     double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

136     x0[0] = CaH200; /* Concentracion de vapor de agua aire interior */
137     x0[1] = Ta0;    /* Temperatura del aire interior */
138     x0[2] = Tcb0;   /* Temperatura de cubierta */
139     x0[3] = Ts10;   /* Temperatura 1era capa del suelo */
140     x0[4] = Ts20;   /* Temperatura 2da capa del suelo */
141     x0[5] = Ts30;   /* Temperatura 3era capa del suelo */
142     x0[6] = Ts40;   /* Temperatura 4era capa del suelo */

143 }
144 #endif /* MDL_INITIALIZE_CONDITIONS */

145 #define MDL_START /* Change to #undef to remove function */
146 #if defined(MDL_START)
147 /* Function: mdlStart =====
148  * Abstract:
149  *    This function is called once at start of model execution. If you
150  *    have states that should be initialized once, this is the place
151  *    to do it.
152  */
153 static void mdlStart(SimStruct *S)
154 {
155 }
156 #endif /* MDL_START */

157 /* Function: mdlOutputs =====
158  * Abstract:
159  *    In this function, you compute the outputs of your S-function
160  *    block. Generally outputs are placed in the output vector, ssGetY(S).
161  */
162 static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
163 {
164     real_T *y=ssGetOutputPortRealSignal(S,0);
165     real_T *x=ssGetContStates(S);
166     InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
167     double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

168     y[0] = x[0]; /* Concentracion de vapor de agua aire */
169     y[1] = x[1]; /* Temperatura del aire */
170     y[2] = x[2]; /* Temperatura de cubierta */

```

```

171     y[3] = x[3]; /* Temperatura 1era capa del suelo */
172     y[4] = x[4]; /* Temperatura 2da capa del suelo */
173     y[5] = x[5]; /* Temperatura 3era capa del suelo */
174     y[6] = x[6]; /* Temperatura 4era capa del suelo */
175     y[7] = humrel(x[1],x[0]); /* Humedad relativa del aire */

176 }

177 #define MDL_UPDATE /* Change to #undef to remove function */
178 #if defined(MDL_UPDATE)
179 /* Function: mdlUpdate =====
180  * Abstract:
181  *   This function is called once for every major integration time step.
182  *   Discrete states are typically updated here, but this function is useful
183  *   for performing any tasks that should only take place once per
184  *   integration step.
185  */
186 static void mdlUpdate(SimStruct *S, int_T tid)
187 {
188 }
189 #endif /* MDL_UPDATE */

190 #define MDL_DERIVATIVES /* Change to #undef to remove function */
191 #if defined(MDL_DERIVATIVES)
192 /* Function: mdlDerivatives =====
193  * Abstract:
194  *   In this function, you compute the S-function block's derivatives.
195  *   The derivatives are placed in the derivative vector, ssGetdX(S).
196  */
197 static void mdlDerivatives(SimStruct *S)
198 {
199     real_T *dx=ssGetdX(S);
200     real_T *x=ssGetContStates(S);
201     InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
202     double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

203     double g, T0, M_cb_a, Qsol_cb, Qcnv_cb_a, Qcnv_cb_e, Qlt_cb;
204     double Qrad_cb_sk, Qrad_s1_cb, Qrad_cb_cu;
205     double FFcb_cu, FFs_cu, FFs_cb, FFs_sk, TRANScu_I1, TRANScu_Is;
206     double M_cu_a, M_a_e, Qcnv_s1_a, Qlt_cu_a, Qsol_s1;
207     double Qcnd_s1s2, Qrad_s1_cu, Qrad_s1_sk, Qcnd_s2s3;
208     double ABSs1_Is, CTMasa_cb_a;
209     double FlujoVent, FlujoInfl, FlujoVentMalla, FlujoVarAux1, FlujoVarAux2;
210     double rs, rb, Rneta, Ca_H2Os, Cvapo;
211     double U_Te, U_Tsk, U_Ce_H2O, U_RadSolExt, U_VelAireExt, U_AREAVc, U_AREAVl;
212     double X_Ca_H2O, X-Ta, X-Tcb, X-Ts1, X-Ts2, X-Ts3, X-Ts4;
213     double FlujoVarAux3, FlujoVarAux4, Qven, VelAireInt;
214     double CCnv_cb_a, CCnv_cb_e, Ccb_H2Os, CCnv_s1_a;
215     double Qcnd_s3s4, Qcnd_s4sub, Tcu, AuxSlopeVPC, SlopeVPC, AuxRad, AuxHumd;
216     double cs1, cs2, cs3, M_H2O, Rg, EMicu;
217     double PVactAireInt, PVsatAireInt, Da, AuxrsRad, AuxrsDa;

```

```

218  /* Variables de entrada */
219  U_Te = u(0); U_Tsk = u(1); U_Ce_H2O = u(2); U_RadSolExt = u(3);
220  U_VelAireExt = u(4); U_AREAvC = u(5); U_AREAv1 = u(6);

221  /* Variables de estado */
222  X_Ca_H2O = x[0]; X-Ta = x[1]; X_Tcb = x[2]; X_Ts1 = x[3]; X_Ts2 = x[4];
223  X_Ts3 = x[5]; X_Ts4 = x[6];

224  T0 = 273.15; Tcu = X-Ta; g = 9.81;

225  /* Coeficientes para calcular presion de vapor */
226  T0=273.15; cs1=610.8; cs2=17.27; cs3=237.3; M_H2O=0.0180; Rg=8.314;

227  /* Flujo de ventilacion natural */
228  if (U_AREAvC + U_AREAv1 > 0) {
229      FlujoVarAux1 = (pow(U_AREAvC*U_AREAv1,2)/(pow(U_AREAvC,2)+pow(U_AREAv1,2)));
230  } else {
231      FlujoVarAux1 = 0.0;
232  }
233  FlujoVarAux2 = 2.0*g*((X-Ta-U_Te)/U_Te)*Hvent;
234  FlujoVarAux3 = pow((U_AREAvC+U_AREAv1)/2,2.0)*COEFCw*pow(U_VelAireExt,2);
235  FlujoVarAux4 = FlujoVarAux1*FlujoVarAux2 + FlujoVarAux3;

236  if (FlujoVarAux4 > 0) {
237      FlujoVent = COEFCd*sqrt(max(FlujoVarAux1 + FlujoVarAux2, 0.0));
238  } else {
239      FlujoVent = 0.0;
240  }

241  /* Flujo por infiltracion */
242  FlujoInfl = AREAs*(COEFinfla + COEFinflb*U_VelAireExt);

243  /* Flujo de ventilacion natural */
244  FlujoVentMalla = FlujoVent*(1.0-COEFmalla)+FlujoInfl;

245  /* Flujo de masa de vapor por ventilacion */
246  M_a_e = FlujoVentMalla*(X_Ca_H2O-U_Ce_H2O);

247  /* Intercambio de calor con el exterior por ventilacion */
248  Qven = DENaire*CPaire*FlujoVentMalla*(X-Ta-U_Te);

249  /* Presion de vapor actual aire interior */
250  PVactAireInt = pvact(X-Ta,X_Ca_H2O);

251  /* Presion de vapor de saturacion aire interior */
252  PVsatAireInt = pvsat(X-Ta);

253  /* Deficit de saturacion aire interior */
254  Da = PVsatAireInt-PVactAireInt;

```

```

255      /* Resistencia estomatica */
256      AuxrsRad = 1.0 + 1.0/(exp(0.05*(TRANScb_Is*U_RadSolExt-50.0)));
257      AuxrsDa  = 1.0 + 0.011*exp(0.34*((Da/100)-10.0));
258      rs = 200.0*AuxrsRad;/*AuxrsDa; */

259      /* Resistencia aerodinamica */
260      VelAireInt = max(FlujoVentMalla/AREAfv, 0.09);
261      rb = 220*pow(Dcu,0.2)/pow(VelAireInt,0.8); /* rb = 200; */

262      /* Radiacion neta que absorbe el cultivo */
263      Rneta = COEFRncu*(1.0-exp(-k_cu_Is*LAI))*TRANScb_Is*U_RadSolExt;

264      /* Pendiente de la curva de presion de vapor a saturacion */
265      AuxSlopeVPC = 2504*exp((17.27*(X-Ta-T0))/((X-Ta-T0)+237.2));
266      SlopeVPC = 1000*(AuxSlopeVPC/pow(X-Ta-T0+237.3,2));

267      Ca_H2Os = humedadabsolutasat(X-Ta);
268      /* Hay transpiracion si (concentracion de humedad) < (concentracion
269         humedad a saturacion) */

270      if (X_Ca_H2O < Ca_H2Os){
271          Cvapo = 1.0;
272      } else {
273          Cvapo = 0.0;
274      }

275      /* Flujo de masa de vapor por transpiracion del cultivo */
276      AuxRad=((SlopeVPC/CONSTpsi)*(Rneta/CALORLAT))/(1.0+SlopeVPC/CONSTpsi+rs/rb);
277      AuxHumd=(2.0*LAI*(Ca_H2Os-X_Ca_H2O))/((1.0+SlopeVPC/CONSTpsi)*rb+rs);
278      M_cu_a = max(AREAs*(AuxRad + AuxHumd), 0.0);

279      /* Calor latente por transpiracion */
280      Qlt_cu_a =CALORLAT*M_cu_a;

281      /* Absorcion de radiacion solar por la cubierta */
282      Qsol_cb = ABScb_Is*AREAcb*U_RadSolExt;

283      /* Conveccion cubierta - aire interior */
284      CCnv_cb_a = COEFcb_a1*pow(abs(X-Ta-X_Tcb),0.33);
285      Qcnv_cb_a = AREAcb*CCnv_cb_a*(X_Tcb-X-Ta);

286      /* Conveccion cubierta - aire exterior */
287      CCnv_cb_e = COEFcb_e1 + COEFcb_e2*pow(U_VelAireExt,COEFcb_e3);
288      Qcnv_cb_e = CCnv_cb_e*AREAcb*(X_Tcb-U_Te);

289      /* Concentracion de vapor a saturacion a la temp. de cubierta */
290      Ccb_H2Os = humedadabsolutasat(X_Tcb);

291      /* Coeficiente de transferencia de masa por condensacion */
292      CTMasa_cb_a = CCnv_cb_a/(DENaire*CPaire*pow(0.89,0.67));

```

```

293  /* Transferencia de masa por condensacion en la cubierta */
294  M_cb_a = max(AREAcb*CTMasa_cb_a*(X_Ca_H2O-Ccb_H2Os), 0.0);

295  /* Calor latente por condensacion en la cubierta */
296  Qlt_cb = CALORLAT*M_cb_a;

297  /* Conveccion superficie del suelo - aire interior */
298  CCnv_s1_a = COEFs1_a2*pow(abs(X-Ta-X-Ts1),0.25);
299  Qcnv_s1_a = CCnv_s1_a*AREAs*(X-Ts1-X-Ta);

300  /* Transmisividad del cultivo a la radiacion solar y termica */
301  TRANScu_I1 = exp(-k_cu_I1*LAI);
302  TRANScu_Is = exp(-k_cu_Is*LAI);

303  /* Absorcion de radiacion solar por la superficie del suelo */
304  ABSs1_Is = TRANScb_Is*(TRANScu_I1+(1.0-TRANScu_I1)*TRANScu_Is);
305  Qsol_s1 = ABSs1_Is*AREAs*U_RadSolExt;

306  /* Conduccion 1era capa - 2da capa */
307  Qcnd_s1s2 = AREAs*(HC_s/dx_s1s2)*(X-Ts1-X-Ts2);

308  /* Conduccion 2da capa - 3era capa */
309  Qcnd_s2s3 = AREAs*(HC_s/dx_s2s3)*(X-Ts2-X-Ts3);

310  /* Conduccion 3da capa - 4era capa */
311  Qcnd_s3s4 = AREAs*(HC_s/dx_s3s4)*(X-Ts3-X-Ts4);

312  /* Conduccion 4da capa - subsuelo */
313  Qcnd_s4sub = AREAs*(HC_s/dx_s4sub)*(X-Ts4-Tsub);

314  /* Radiacion termica cubierta - boveda celeste */
315  Qrad_cb_sk = AREAcb*EMIcb*EMIs*FFcb_sk*CSBOLTZ*(pow(X-Tcb,4)-pow(U-Tsk,4));
316  /* de Zwart pag 93*/
317  Qrad_cb_sk = EMIcb*EMIs*CSBOLTZ*(pow(X-Tcb,4)-pow(U-Tsk,4));

318  /* Radiacion termica cubierta - cultivo */
319  FFcb_cu = (1.0-TRANScu_I1)*FFcb_sk; EMicu = 1.0-TRANScu_I1;
320  Qrad_cb_cu = AREAcb*EMIcb*EMicu*FFcb_cu*CSBOLTZ*(pow(X-Tcb,4)-pow(Tcu,4));

321  /* Radiacion termica suelo - cultivo */
322  FFs_cu = 1.0-TRANScu_I1;
323  Qrad_s1_cu = AREAs*EMIs*EMicu*FFs_cu*CSBOLTZ*(pow(X-Ts1,4)-pow(Tcu,4));

324  /* Radiacion termica suelo - cubierta */
325  FFs_cb = 1.0-FFs_cu;
326  Qrad_s1_cb = AREAs*EMIs*EMIcb*FFs_cb*CSBOLTZ*(pow(X-Ts1,4)-pow(X-Tcb,4));

327  /* Radiacion termica suelo - boveda celeste */
328  FFs_sk = FFs_cb*TRANScb_I1;
329  Qrad_s1_sk = AREAs*EMIs*EMIs*FFs_sk*CSBOLTZ*(pow(X-Ts1,4)-pow(U-Tsk,4));

```

```

330  /* Variables de estado: Ca_H20:x[0] Ta:x[1] Tcb:x[2] Ts1:x[3] Ts2:x[4] */
331  /*                               Ts3:x[5] Ts4:x[6]                               */

332  /* Concentracion de vapor de agua en el aire interior: Ca_H20 {kg/m3} */
333  dx[0] = (1.0/VOLgrh)*(Cvapo*M_cu_a - M_cb_a - M_a_e);

334  /* Temperatura del aire interior: Ta {K} */
335  dx[1] = (1.0/(DENaire*CPaire*VOLgrh))*(Qcnv_cb_a + Qcnv_s1_a - Qven);

336  /* Temperatura de cubierta: Tcb {K} */
337  dx[2] = (1.0/(DENcb*CPcb*VOLcb))*(Qsol_cb - Qcnv_cb_a - Qcnv_cb_e + Qlt_cb
338          + Qrad_s1_cb - Qrad_cb_cu - Qrad_cb_sk);

339  /* Temperatura primera capa de suelo: Ts1 {K} */
340  dx[3] = (1.0/(VHCs1*VOLs1))*(Qsol_s1 - Qcnv_s1_a - Qcnd_s1s2 - Qrad_s1_cu
341          - Qrad_s1_cb - Qrad_s1_sk);

342  /* Temperatura segunda capa de suelo: Ts2 {K} */
343  dx[4] = (1.0/(VHCs2*VOLs2))*(Qcnd_s1s2 - Qcnd_s2s3);

344  /* Temperatura tercera capa de suelo: Ts3 {K} */
345  dx[5] = (1.0/(VHCs3*VOLs3))*(Qcnd_s2s3 - Qcnd_s3s4);

346  /* Temperatura cuarta capa de suelo: Ts4 {K} */
347  dx[6] = (1.0/(VHCs4*VOLs4))*(Qcnd_s3s4 - Qcnd_s4sub);

348 }
349 #endif /* MDL_DERIVATIVES */

350 /* Function: mdlTerminate =====
351  * Abstract:
352  *   In this function, you should perform any actions that are necessary
353  *   at the termination of a simulation. For example, if memory was
354  *   allocated in mdlInitializeConditions, this is the place to free it.
355  */
356 static void mdlTerminate(SimStruct *S)
357 {
358 }

359 /*=====
360  * Required S-function trailer *
361  *=====*/

362 /*****
363  * Ta:      Temperatura aire (K)      *
364  * CTa_H20: Concentracion humedad kg/m3      *
365  *****/
366 double humrel(double Tx, double Cx_H20)

```



```

367 {
368     double HR, T0;
369     double PVS_Tx, Cx_H2Os;
370     double cs1, cs2, cs3, Rg, M_H2O;

371     T0 = 273.15; M_H2O = 0.0180; Rg = 8.314;
372     cs1 = 610.8; cs2 = 17.27; cs3 = 237.3;

373     PVS_Tx = cs1*exp((cs2*(Tx-T0))/((Tx-T0)+cs3)); /* Pa */
374     Cx_H2Os = (PVS_Tx*M_H2O)/(Rg*Tx); /* kg/m3 */

375     HR = 100*(Cx_H2O/Cx_H2Os); /* HR en porciento */

376     if (HR < 0) {
377         HR = 0.0;
378     }

379     if (HR > 100) {
380         HR = 100.0;
381     }

382     return HR;
383 }

384 /*****
385  * Tx:      Temperatura del objeto (K)      *
386  *****/
387 double humedadabsolutasat(double Tx)
388 {
389     double T0, cs1, cs2, cs3, Cx_H2Os, PVS_Tx, Rg, M_H2O;
390     T0=273.15; M_H2O = 0.0180; Rg = 8.314;
391     cs1=610.8; cs2=17.27; cs3=237.3;

392     PVS_Tx = cs1*exp((cs2*(Tx-T0))/((Tx-T0)+cs3)); /* Pa */
393     Cx_H2Os = (PVS_Tx*M_H2O)/(Rg*Tx); /* kg/m3 */

394     return Cx_H2Os;
395 }

396 /*****
397  * Tx:      Temperatura del objeto (K)      *
398  *****/
399 double pvsat(double Tx)
400 {
401     double T0, cs1, cs2, cs3, PVsat;
402     T0=273.15; cs1=610.8; cs2=17.27; cs3=237.3;

403     PVsat = cs1*exp((cs2*(Tx-T0))/((Tx-T0)+cs3)); /* Pa */

```

```

404     return PVsat;
405 }

406 /*****
407  * Tx:      Temperatura (K)                *
408  * CxH2O:   Concentracion humedad kg/m3    *
409  *****/
410 double pvact(double Tx, double CxH2O)
411 {
412     double T0, cs1, cs2, cs3, CxH2Os, PVsat, Rg, M_H2O, PVact;
413     T0=273.15; M_H2O = 0.0180; Rg = 8.314;
414     cs1=610.8; cs2=17.27; cs3=237.3;

415     PVsat = cs1*exp((cs2*(Tx-T0))/((Tx-T0)+cs3)); /* Pa */
416     CxH2Os = (PVsat*M_H2O)/(Rg*Tx); /* kg/m3 */
417     PVact = PVsat*(CxH2O/CxH2Os); /* Pa */

418     return PVact;
419 }

420 #ifdef MATLAB_MEX_FILE /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
421 #include "simulink.c" /* MEX-file interface mechanism */
422 #else
423 #include cg_sfuns.h" /* Code generation registration function */
424 #endif

```

Apéndice C

IMPLEMENTACIÓN C-MEX S-FUNCTION DEL MODELO PARA CONTROL DEL CLIMA DEL INVERNADERO

```

1  /*-----*
2  * Modelo para Control del Clima de un Invernadero          *
3  * Tesis de Maestria de Agustin Ruiz Garcia                *
4  * Posgrado IAUIA Universidad Autonoma Chapingo            *
5  * Chapingo Mex., Junio de 2008                            *
6  * Revision: Diciembre de 2008                             *
7  * archivo: modeloctrl.c                                    *
8  *-----*/

9  #define S_FUNCTION_LEVEL 2
10 #define S_FUNCTION_NAME modeloctrl

11 #include "simstruc.h"
12 #include <math.h>

13 #define max(A,B) ((A) > (B) ? (A) : (B))
14 #define min(A,B) ((A) < (B) ? (A) : (B))
15 #define u(element)(*uPtrs[element])

16 double humrel(double Tx, double Cx_H20);
17 double humedadabsolutasat(double Tx);

18 /* Used to read the parameter number 1 */

19 #define Ta0          p[0]
20 #define Ts0          p[1]
21 #define Ca0          p[2]
22 #define Vgrh         p[3]
23 #define AREAs        p[4]
24 #define AREAcb       p[5]
25 #define ds           p[6]
26 #define dxssub       p[7]
27 #define LAI          p[8]
28 #define Tsub         p[9]
29 #define TRANSinv     p[10]
30 #define k_cu_Is      p[11]
31 #define COEFrb       p[12]
32 #define COEFCw       p[13]

```

```

33 #define ROaire          p[14]
34 #define CPaire          p[15]
35 #define CONSTpsi        p[16]
36 #define CALORLAT        p[17]
37 #define COEFCd           p[18]
38 #define COEFabsaire      p[19]
39 #define COEFabss         p[20]
40 #define COEFRncul        p[21]
41 #define COEFinfl         p[22]
42 #define COEFmalla        p[23]
43 #define COEFcb_a1        p[24]
44 #define COEFa_e1         p[25]
45 #define COEFa_e2         p[26]
46 #define COEFs_a          p[27]
47 #define CPVOLs           p[28]
48 #define COEFCnds         p[29]

49 /*=====
50  * S-function methods *
51  *=====*/

52 /* Function: mdlInitializeSizes =====
53  * Abstract:
54  *   The sizes information is used by Simulink to determine the S-function
55  *   block's characteristics (number of inputs, outputs, states, etc.).
56  */

57 static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
58 {
59     ssSetNumSFcnParams(S, 1); /* Number of expected parameters */
60     if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
61         /* Return if number of expected != number of actual parameters */
62         return;
63     }

64     ssSetNumContStates(S, 3);
65     ssSetNumDiscStates(S, 0);

66     if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
67     ssSetInputPortWidth(S, 0, 7);

68     ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);

69     if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
70     ssSetOutputPortWidth(S, 0, 4);

71     ssSetNumSampleTimes(S, 1);
72     ssSetNumRWork(S, 0);
73     ssSetNumIWork(S, 0);
74     ssSetNumPWork(S, 0);
75     ssSetNumModes(S, 0);

```

```

76     ssSetNumNonsampledZCs(S, 0);

77     ssSetOptions(S, 0);
78 }

79 /* Function: mdlInitializeSampleTimes =====
80 * Abstract:
81 *   This function is used to specify the sample time(s) for your
82 *   S-function. You must register the same number of sample times as
83 *   specified in ssSetNumSampleTimes.
84 */
85 static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
86 {
87     ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
88     ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);

89 }

90 #define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS /* Change to #undef to remove function */
91 #if defined(MDL_INITIALIZE_CONDITIONS)
92 /* Function: mdlInitializeConditions =====
93 * Abstract:
94 *   In this function, you should initialize the continuous and discrete
95 *   states for your S-function block. The initial states are placed
96 *   in the state vector, ssGetContStates(S) or ssGetRealDiscStates(S).
97 *   You can also perform any other initialization activities that your
98 *   S-function may require. Note, this routine will be called at the
99 *   start of simulation and if it is present in an enabled subsystem
100 *   configured to reset states, it will be call when the enabled subsystem
101 *   restarts execution to reset the states.
102 */

103 static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
104 {
105     real_T *x0=ssGetContStates(S);
106     double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

107     x0[0] = Ta0; /* Temperatura del aire */
108     x0[1] = Ts0; /* Temperatura del suelo */
109     x0[2] = Ca0; /* Humedad del aire */

110 }
111 #endif /* MDL_INITIALIZE_CONDITIONS */

112 #define MDL_START /* Change to #undef to remove function */
113 #if defined(MDL_START)
114 /* Function: mdlStart =====
115 * Abstract:

```

```

116  *   This function is called once at start of model execution. If you
117  *   have states that should be initialized once, this is the place
118  *   to do it.
119  */
120 static void mdlStart(SimStruct *S)
121 {
122 }
123 #endif /* MDL_START */

124 /* Function: mdlOutputs =====
125  * Abstract:
126  *   In this function, you compute the outputs of your S-function
127  *   block. Generally outputs are placed in the output vector, ssGetY(S).
128  */

129 static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
130 {
131     real_T *y = ssGetOutputPortRealSignal(S,0);
132     real_T *x = ssGetContStates(S);
133     InputRealPtrsType uPtrs = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
134     double *p = mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

135     y[0] = x[0]; /* Temperatura del aire */
136     y[1] = x[1]; /* Temperatura del suelo */
137     y[2] = x[2]; /* Humedad del aire */
138     y[3] = humrel(x[0],x[2]); /* Humedad relativa del aire */

139 }

140 #define MDL_UPDATE /* Change to #undef to remove function */
141 #if defined(MDL_UPDATE)
142 /* Function: mdlUpdate =====
143  * Abstract:
144  *   This function is called once for every major integration time step.
145  *   Discrete states are typically updated here, but this function is useful
146  *   for performing any tasks that should only take place once per
147  *   integration step.
148  */

149 static void mdlUpdate(SimStruct *S, int_T tid)
150 {
151 }
152 #endif /* MDL_UPDATE */

153 #define MDL_DERIVATIVES /* Change to #undef to remove function */
154 #if defined(MDL_DERIVATIVES)
155 /* Function: mdlDerivatives =====
156  * Abstract:
157  *   In this function, you compute the S-function block's derivatives.
158  *   The derivatives are placed in the derivative vector, ssGetdX(S).

```

```

159  */

160 static void mdlDerivatives(SimStruct *S)
161 {
162     real_T *dx=ssGetdX(S);
163     real_T *x=ssGetContStates(S);
164     InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
165     double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

166     double Qsol_a, Qcnv_s_a, Qcnv_a_e, Qven, Qtransp;
167     double M.transp, Cevap, FlujoMalla, FlujoVent, FlujoInfilt;
168     double Cnv_a_e, Qsol_s, Qcnd_s_sub, rs, RadNeta, SlopeVPC;
169     double T0, cs1, cs2, cs3, U_Tcb, Ca_H2Os, Cnv_cb_a, Rg, M_H2O;
170     double X.Ta, X.Ca_H2O, X.Ts, AuxRad, AuxHumd, AuxSlopeVPC;
171     double U.Te, U.Ce_H2O, U_ve, U.So, U.AREAv_c, U.AREAv_l;
172     double M.vent, Cnv_s_a, Ccbi_H2Os, COEFTM_a_cb, M_a_cb;

173     /*
174     * Variables de entrada:
175     * u(0)= Temperatura fuera del invernadero, K
176     * u(1)= Humedad absoluta externa, kg/m3
177     * u(2)= Velocidad del viento, m/s
178     * u(3)= Radiacion fuera del invernadero, W/m2
179     * u(4)= Area de apertura ventanas cenitales, m2
180     * u(5)= Area de apertura ventanas laterales, m2
181     * u(6)= Temperatura de cubierta, K
182     */

183     U.Te = u(0); U.Ce_H2O = u(1); U_ve = u(2); U.So = u(3);
184     U.AREAv_c = u(4); U.AREAv_l = u(5); U_Tcb = u(6);

185     /* x[0] = Temperatura del aire, K */
186     /* x[1] = Humedad del aire, kg/m3 */
187     /* x[2] = Temperatura del suelo, K */
188     X.Ta = x[0]; X.Ts = x[1]; X.Ca_H2O = x[2];

189     T0=273.15; cs1=610.8; cs2=17.27; cs3=237.3; M_H2O=0.0180; Rg=8.314;

190     /* Tasa de ventilacion */
191     if (U.AREAv_c + U.AREAv_l <= 0) {
192         FlujoVent = 0.0;
193     } else {
194         FlujoVent=((U.AREAv_c+U.AREAv_l)/2.0)*COEFCd*pow(COEFCw,0.5)*U_ve;
195     }

196     /* Infiltracion */
197     FlujoInfilt = AREAs*COEFinfl;

198     /* Caudal de renovacion del aire */
199     FlujoMalla = (1.0-COEFmalla)*FlujoVent + FlujoInfilt;

```

```

200  /* Intercambio de energia por ventilacion e infiltracion */
201  Qven = ROaire*CPaire*FlujoMalla*(X-Ta-U.Te);

202  /* Flujo de masa de vapor por ventilacion */
203  M_vent = FlujoMalla*(X.Ca_H2O-U.Ce_H2O);

204  /* Conveccion suelo - aire interior */
205  Cnv_s_a = COEFs_a*pow(abs(X.Ts-X-Ta),0.33);

206  /* Intercambio de energia suelo - aire interior */
207  Qcnv_s_a = AREAs*Cnv_s_a*(X.Ts-X-Ta);

208  /* Coef. global de transferencia cubierta - aire exterior */
209  Cnv_a_e = COEFa_e1 + COEFa_e2*U_ve;

210  /* Intercambio de energia por conveccion */
211  Qcnv_a_e = AREAcb*Cnv_a_e*(X-Ta-U.Te);

212  /* Conveccion aire interior */
213  if ((X-Ta-U.Tcb) >= 0)
214      Cnv_cb_a = COEFcb_a1*pow(X-Ta-U.Tcb,0.33);
215  else
216      Cnv_cb_a = COEFcb_a1*pow(U.Tcb-X-Ta,0.33);

217  /* Coeficiente de transferencia de masa por condensacion */
218  COEFTM_a_cb = Cnv_cb_a/(ROaire*CPaire*pow(0.89,0.6667));

219  /* Humedad absoluta a saturacion a la temperatura de cubierta */
220  Ccbi_H2Os = humedadabsolutasat(U.Tcb);

221  /* Transferencia de masa por condensacion */
222  M_a_cb = AREAcb*COEFTM_a_cb*max(X.Ca_H2O-Ccbi_H2Os, 0.0);

223  /* Energia solar siministrada al aire */
224  Qsol_a = AREAs*COEFabsaire*TRANSinv*U.So;

225  /* Energia almacenada por el suelo */
226  Qsol_s = AREAs*COEFabss*TRANSinv*U.So;

227  /* Conduccion de energia hacia el subsuelo */
228  Qcnd_s_sub = AREAs*(COEFcnds/dxssub)*(X.Ts-Tsub);

229  /* Humedad absoluta del aire interior */
230  Ca_H2Os = humedadabsolutasat(X-Ta); /* kg/m3 */

231  /* Existe transpiracion si el aire no esta saturado */
232  if (X.Ca_H2O < Ca_H2Os){
233      Cevap = 1.0;
234  } else {
235      Cevap = 0.0;
236  }

```



```

237  /* Radiacion neta que absorbe el cultivo */
238  RadNeta = COEFRncul*(1.0-exp(-k.cu.Is*LAI))*TRANSinv*U.So;

239  /* resistencia interna */
240  AuxSlopeVPC = 2504*exp((17.27*(X.Ta-T0))/((X.Ta-T0)+237.2));
241  SlopeVPC=1000*(AuxSlopeVPC/pow(X.Ta-T0+237.3,2));
242  rs = 200.0*(1.0+1.0/(exp(0.05*(TRANSinv*U.So-50.0))));
243  AuxRad=((SlopeVPC/CONSTpsi)*(RadNeta/CALORLAT))/(1+SlopeVPC/CONSTpsi+rs/COEFRb);
244  AuxHumd=(2.0*LAI*(Ca_H2Os-X.Ca_H2O))/((1+(SlopeVPC/CONSTpsi))*COEFRb+rs);

245  /* Flujo de masa de vapor por transpiracion */
246  M.transp = max(AREAs*(AuxRad + AuxHumd), 0.0);

247  /* Perdidad de energia debido a transpiracion del cultivo */
248  Qtransp = CALORLAT*M.transp;

249  /* Temperatura del aire (K) */
250  dx[0] = (1.0/(ROaire*CPaire*Vgrh))*(Qsol_a + Qcnv_s_a - Qcnv_a_e - Qven
251          - Cevap*Qtransp);

252  /* Temperatura del suelo (K) */
253  dx[1] = (1.0/(CPVOLs*AREAs*ds))*(Qsol_s - Qcnv_s_a - Qcnd_s_sub);

254  /* Humedad del aire (kg/m3)*/
255  dx[2] = (1.0/Vgrh)*(Cevap*M.transp - M.a_cb - M.vent);

256 }
257 #endif /* MDL_DERIVATIVES */

258 /* Function: mdlTerminate =====
259  * Abstract:
260  *   In this function, you should perform any actions that are necessary
261  *   at the termination of a simulation. For example, if memory was
262  *   allocated in mdlInitializeConditions, this is the place to free it.
263  */
264 static void mdlTerminate(SimStruct *S)
265 {
266 }

267 /*=====
268  * Required S-function trailer *
269  *=====*/

270 /*****
271  * Ta:      Temperatura aire (K)      *
272  * CTa_H2O: Concentracion humedad kg/m3      *
273  *****/

```

```

274 double humrel(double Tx, double Cx_H2O)
275 {
276     double HR, T0;
277     double PVS_Tx, Cx_H2Os;
278     double cs1, cs2, cs3, Rg, M_H2O;

279     T0 = 273.15; M_H2O = 0.0180; Rg = 8.314;
280     cs1 = 610.8; cs2 = 17.27; cs3 = 237.3;

281     PVS_Tx = cs1*exp((cs2*(Tx-T0))/((Tx-T0)+cs3)); /* Pa */
282     Cx_H2Os = (PVS_Tx*M_H2O)/(Rg*Tx); /* kg/m3 */

283     HR = 100*(Cx_H2O/Cx_H2Os); /* HR en porciento */

284     if (HR < 0) {
285         HR = 0.0;
286     }

287     if (HR > 100) {
288         HR = 100.0;
289     }

290     return HR;
291 }

292 /*****
293  * Tx:      Temperatura del objeto (K)      *
294  *****/
295 double humedadabsolutasat(double Tx)
296 {
297     double T0, cs1, cs2, cs3, Cx_H2Os, PVS_Tx, Rg, M_H2O;
298     T0=273.15; M_H2O = 0.0180; Rg = 8.314;
299     cs1=610.8; cs2=17.27; cs3=237.3;

300     PVS_Tx = cs1*exp((cs2*(Tx-T0))/((Tx-T0)+cs3)); /* Pa */
301     Cx_H2Os = (PVS_Tx*M_H2O)/(Rg*Tx); /* kg/m3 */

302     return Cx_H2Os;
303 }

304 /*****
305  * Required S-function trailer *
306  *****/

307 #ifdef MATLAB_MEX_FILE /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
308 #include "simulink.c" /* MEX-file interface mechanism */
309 #else
310 #include "cg_sfuns.h" /* Code generation registration function */
311 #endif

```