

# A model of humidity within a semi-closed greenhouse

Modelo de humedad en un invernadero semicerrado

Raquel Salazar-Moreno\*; Azucelli Maythe Mauricio-Pérez;  
Irineo Lorenzo López-Cruz; Abraham Rojano-Aguilar

Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.  
Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. MÉXICO.  
Email: raquels60@hotmail.com, tel.: (595) 107 51 36 (\*Corresponding author).

## Abstract

Semi-closed greenhouses are more efficient in water and energy use than conventional ones. However, one of the challenges is the humidity control. This paper is based on experimental data generated during the 2012 tomato production cycle in a semi-closed greenhouse located at the Humboldt University of Berlin. The aim was to generate two models for simulation of the humidity behavior. In the first model, the greenhouse was completely closed and only transpiration and condensation processes were taking place. In this model, after calibration, a mean absolute error (MAE) of 1.94 and a correlation coefficient ( $r$ ) of 0.87 were obtained, with the boundary layer resistance and the radiation extinction coefficient being the most varying parameters. The second model, in addition to the processes considered in the first, had natural ventilation, so a sensitivity analysis was performed before calibration, resulting in a MAE = 2.17 and  $r = 0.85$ , with the latent heat of vaporization and the radiation extinction coefficient being the most sensitive parameters. The developed models allow for a quantitative comparison of the processes involved in the water balance in the open and closed system, and will thus enable us to improve control over this factor. Both models were implemented using Simulink in Matlab®.

**Keywords:** transpiration, condensation, ventilation, calibration, sensitivity analysis.

## Resumen

Los invernaderos semicerrados son más eficientes en el uso del agua y energía respecto de los convencionales. Sin embargo, uno de los desafíos es el control de la humedad. En este trabajo, se utilizó la información generada durante el ciclo 2012 de producción de jitomate, en un invernadero semicerrado ubicado en la Universidad Humboldt de Berlín. Lo anterior con el objetivo de generar dos modelos para simular el comportamiento de la humedad. El primero, cuando el invernadero estaba totalmente cerrado y únicamente se llevaba a cabo los procesos de evaporación y condensación; en éste, después de la calibración, se obtuvo un error medio absoluto (MAE) de 1.94 y coeficiente de correlación ( $r$ ) de 0.87, siendo la resistencia de la capa límite y el coeficiente de extinción de la radiación los parámetros más cambiantes. El segundo, además de los procesos considerados en el primero, tenía ventilación natural, por lo que se realizó un análisis de sensibilidad antes de la calibración, reportándose un MAE = 2.17 y  $r = 0.85$ , siendo el calor latente de vaporización y el coeficiente de extinción de la radiación los parámetros más sensibles. Los modelos desarrollados permiten hacer una comparación cuantitativa de los procesos involucrados en el balance de humedad en el sistema abierto y cerrado, y de esta manera mejorar el control de este factor. Ambos modelos se implementaron utilizando Simulink en Matlab®.

**Palabras claves:** transpiración, condensación, ventilación, calibración, análisis de sensibilidad.



## Introduction

Over the past decade, closed or semi-closed greenhouses have been successfully used in Europe and the United States because of the benefits in saving water and energy, and because of the increased efficiency of CO<sub>2</sub> enrichment (Salazar-Moreno, Rojano-Aguilar, & López-Cruz, 2014), which is reflected in better yields and product quality. However, one of the problems associated with total or partial closure of the greenhouse is excess humidity, which can be avoided if the water vapor can be condensed without any dripping onto the crop (Baptista, Bailey, Randall, & Meneses, 1999). Most greenhouse structures do not achieve this aim; for this reason, semi-closed greenhouses have heat exchangers and gutters in the ceiling to carry out water vapor condensation.

In order to analyze the behavior of humidity in a greenhouse, it is necessary to simulate the water balance within it, for which there are several dynamic models that have been developed over the past 30 years. For example, Stanghellini (1987) analyzed the interrelationships between the microclimate and humidity surrounding the crop, and showed that the energy balance of a greenhouse crop provides a solid basis for quantifying the impact of microclimate on humidity and identifying limit values in climate management. The above-mentioned article reports the results of an experiment in which sub-models for the heat transfer of the foliage are defined; the sub-models were merged in an equation to obtain the temperature and transpiration of a greenhouse crop. The resulting estimates accurately reproduced the temperature and transpiration of a greenhouse tomato crop, as measured at time intervals of a few minutes (Stanghellini, 1987).

Jolliet and Bailey (1992) took as a basis the Stanghellini (1987) model and measured the effect of some meteorological variables (air speed, vapor pressure deficit, solar radiation and CO<sub>2</sub> concentration) on tomato transpiration, and studied climate control in a greenhouse by evaluating five transpiration models. For a young crop (leaf area index,  $LAI = 0.56$ ) they found that an increase in solar radiation of  $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  resulted in an increase in transpiration of  $0.09 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ , whereas an increase in vapor pressure deficit of  $0.1 \text{ kPa}$  increased transpiration by  $0.013 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$  and air speed of  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  increased transpiration by  $0.13 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ . They also reported that for a more mature crop ( $LAI = 2.94$ ), radiation had a slightly higher effect (an increase of  $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  caused an increase of  $0.14 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ ), but the vapor pressure deficit was much higher (an increase of  $0.1 \text{ kPa}$  generated an increase of  $0.24 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$  in transpiration).

Jolliet and Bailey (1992) concluded that the transpiration rate increased linearly with solar radiation, vapor pressure deficit and air speed. Air temperature, CO<sub>2</sub>

## Introducción

Durante la última década, los invernaderos cerrados o semicerrados se han utilizado con éxito en Europa y Estados Unidos de América debido a los beneficios en ahorro de agua y energía, además por el incremento en la eficiencia del enriquecimiento de CO<sub>2</sub> (Salazar-Moreno, Rojano-Aguilar, & López-Cruz, 2014). Lo anterior se refleja en mejores rendimientos y calidad del producto. Sin embargo, uno de los problemas asociados al cierre total o parcial del invernadero es el exceso de humedad, lo cual se puede evitar si se logra condensar el vapor de agua sin que exista goteo sobre el cultivo (Baptista, Bailey, Randall, & Meneses, 1999). La mayoría de las estructuras de invernaderos no logran este objetivo; por esta razón, los semicerrados cuentan con intercambiadores de calor y canalones en el techo para que ahí se lleve a cabo la condensación.

Para poder analizar el comportamiento de la humedad en un invernadero es necesario realizar el balance de agua dentro del mismo; para lo cual existen diversos modelos dinámicos que se han venido desarrollando desde hace más de 30 años. Por ejemplo, Stanghellini (1987) analizó las interrelaciones entre el microclima y la humedad que rodea al cultivo, y mostró que el balance de energía de un cultivo en invernadero provee una base sólida para cuantificar el impacto del microclima en la humedad e identificar los valores límite en el manejo climático. En el artículo anterior, se muestran los resultados de un experimento en el que se definieron submodelos para la transferencia de calor del follaje, éstos se incorporaron en una ecuación para obtener la temperatura y transpiración del cultivo en invernadero. Las estimaciones obtenidas reprodujeron con buena precisión la temperatura y transpiración del cultivo de jitomate en invernadero, respecto a las mediciones hechas a intervalos de pocos minutos (Stanghellini, 1987).

Jolliet y Bailey (1992) tomaron como base el modelo de Stanghellini (1987) y midieron el efecto de algunas variables meteorológicas (velocidad del viento, déficit de presión de vapor, radiación solar y concentración de CO<sub>2</sub>) en la transpiración del jitomate, y estudiaron el control del clima en un invernadero mediante la evaluación de cinco modelos de transpiración. En un cultivo joven (índice de área foliar,  $LAI = 0.56$ ) encontraron que la transpiración aumentó  $0.09$ ,  $0.013$  y  $0.13 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ , conforme el aumento en la radiación solar de  $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ , el déficit de presión de vapor de  $0.1 \text{ kPa}$  y una velocidad del viento de  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente. También reportaron que para un cultivo más desarrollado ( $LAI = 2.94$ ) la radiación tuvo un efecto ligeramente mayor (un incremento de  $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  provocó un aumento de  $0.14 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ ), pero el déficit de presión de vapor fue mucho mayor

concentration and heating pipe temperature had no significant effect on this rate.

Jolliet (1994), proposed the HORTITRANS model two years later to predict air humidity and crop transpiration as functions of outside weather conditions in order to develop optimal control strategies for humidity in greenhouses. This model includes the processes of transpiration, condensation, ventilation and humidification, and also allows the inside vapor pressure to be calculated as a function of outside conditions and greenhouse characteristics. Since the terms of the model are linear, it is possible to determine the amount of water and energy to be added to or extracted from the greenhouse air, in order to achieve humidity or transpiration set-points.

Stanghellini and de Jong (1995) emphasized the ventilation process in a greenhouse with natural ventilation and conducted an extensive analysis of the parameters related to it and the combined effect of temperature and wind.

Boulard and Wang (2000) presented a model to predict crop transpiration in a greenhouse. In it, the water vapor balance does not consider the condensation on the cover or on the heat exchangers in the ceiling, an important component when the greenhouse is closed. The estimates were better in summer than in spring, and comparisons with other transpiration models showed that considering outside conditions and not inside ones, as a boundary condition, involves deterioration in model performance. The authors attribute this to simplifications introduced during model derivation. Its performance was satisfactory when the greenhouse air was closely coupled to outdoor conditions.

Bontsema et al. (2007) conducted a review of the water balance in a greenhouse, including transpiration, condensation and ventilation flux equations, as well as the parameters involved; they also presented equations that consider the condensation on the ceiling and heat exchangers.

Since there have been few attempts to model the humidity within a semi-closed greenhouse, this paper uses as references the work conducted by Stanghellini and de Jong (1995), Bontsema et al. (2007), and Van Beveren, Bontsema, Van Straten, and Van Henten (2014), adapting some equations to develop a dynamic water balance model. To carry out the sensitivity analysis, the methodology presented by Saltelli, Chan, and Scott (2000) was used.

The aims of this study were: 1) to develop a dynamic model for the humidity behavior inside of a greenhouse when it is fully closed, 2) to develop a dynamic model for the humidity behavior inside of a greenhouse when there is natural ventilation and 3) to identify the most

(un incremento de 0.1 kPa generó un aumento de 0.24 mm-día<sup>-1</sup> en la transpiración).

Jolliet y Bailey (1992) concluyeron que la tasa de transpiración se incrementó linealmente con la radiación solar, el déficit de presión de vapor y la velocidad del viento. La temperatura del aire, la concentración de CO<sub>2</sub> y la temperatura de la tubería de calefacción no tuvieron efecto significativo en esta tasa.

Jolliet (1994), propuso el modelo HORTITRANS dos años después para predecir la humedad del aire y transpiración del cultivo, como funciones de las condiciones meteorológicas externas del invernadero, con el objetivo de desarrollar algunas estrategias de control óptimo de humedad. Este modelo incluye los procesos de transpiración, condensación, ventilación y humidificación, además permite calcular la presión de vapor interna como una función de las condiciones ambientales externas y de las características del invernadero. Dado que los términos del modelo son lineales, es posible determinar la cantidad de agua y energía añadida o extraída al aire, dentro del invernadero, para alcanzar un umbral de humedad o transpiración.

Stanghellini y de Jong (1995) hicieron énfasis en el proceso de ventilación en un invernadero con aeración natural y realizaron un análisis extenso de los parámetros relacionados con ésta y el efecto combinado de la temperatura y el viento.

Boulard y Wang (2000) presentaron un modelo para predecir la transpiración de un cultivo en invernadero. En éste, el balance de vapor de agua no considera la condensación en la cubierta ni en los intercambiadores de calor en el techo, un componente importante cuando el invernadero está cerrado. Las estimaciones fueron mejores en verano que en primavera, y al compararse con otros modelos de transpiración se mostró que considerar las condiciones ambientales externas y no las internas, como una condición límite, implican deterioro en el desempeño del modelo. Los autores lo atribuyen a las simplificaciones introducidas durante la derivación del modelo. Su desempeño fue satisfactorio cuando el aire del invernadero casi se acopló a las condiciones externas.

Bontsema, et al. (2007) abordan una revisión sobre el balance de humedad en un invernadero, incluyendo las ecuaciones de flujos de transpiración, condensación y ventilación, así como de los parámetros involucrados; además presentan las ecuaciones que consideran la condensación en el techo y en los intercambiadores de calor.

Dado que la modelación de la humedad dentro de un invernadero semicerrado ha sido poco estudiada, en

important parameters that influence the performance of both models by local sensitivity analysis and calibration.

## Materials and methods

The study was conducted in a semi-closed greenhouse with tomato crop located at the Institute of Horticulture, Humboldt University of Berlin, Germany; this greenhouse has different characteristics than others, in that the energy storage tank is at the same level as the greenhouse, and not underground as is the case with most solar collectors.

The greenhouse is a Venlo type (Figure 1), measuring 24 x 12.8 x 6.7 m (length, width and height, respectively) and it is composed of four sections. The ground area is 307.2 m<sup>2</sup>, the volume 2,058.24 m<sup>3</sup>, the window area 51.2 m<sup>2</sup>, which represents 16.67 % of the ground area, and it has four ridges with a height of 1.4 m and a width of 3.2 m. The greenhouse is equipped with double glazing and a thermal screen, a cooling tower, a heat pump, and hydraulic switches, plus a 300 m<sup>3</sup> capacity tank with water for energy storage, which is covered with insulation to prevent heat loss.

Plants function as a cooling surface. By transpiring, a plant is cooled and the water vapor rises towards the roof where the heat exchangers are located (in the form of corrugated pipes); there water circulates at dew point temperature, producing vapor condensation. Beneath the exchangers there are some gutters where the water from the condensation process is received and then conducted to a collection tank.



**Figure 1. Venlo greenhouse where measurements were made.**

**Figura 1. Invernadero tipo venlo donde se realizaron las mediciones.**

el presente trabajo se utilizaron como referencia los trabajos desarrollados por Stanghellini y de Jong (1995), Bontsema, et al. (2007), y Van Beveren, Bontsema, Van Straten, y Van Henten (2014), adaptando algunas ecuaciones para desarrollar el modelo dinámico de balance de humedad. Para desarrollar el análisis de sensibilidad se utilizó la metodología presentada por Saltelli, Chan, y Scott (2000).

Los objetivos de la presente investigación fueron: 1) desarrollar un modelo dinámico del comportamiento de la humedad dentro del invernadero cuando éste se encuentra totalmente cerrado, 2) desarrollar un modelo dinámico del comportamiento de la humedad dentro del invernadero cuando existe ventilación natural y 3) identificar los parámetros que más influyen en el desempeño de ambos modelos mediante el análisis de sensibilidad local y calibración.

## Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en un invernadero semicerrado con cultivo de jitomate ubicado en el Instituto de Horticultura de la Universidad Humboldt de Berlín, Alemania; el cual tiene características diferentes a otros, en el sentido de que el tanque de almacenamiento de energía está al mismo nivel que el invernadero, y no subterráneo como en la mayoría de los colectores solares.

El invernadero bajo estudio es tipo venlo (Figura 1), sus medidas son 24 x 12.8 x 6.7 m (largo, ancho y alto, respectivamente) y está compuesto de cuatro naves. El área de piso es de 307.2 m<sup>2</sup>, el volumen de 2,058.24 m<sup>3</sup>, el área de ventanas es de 51.2 m<sup>2</sup>, que representa el 16.67 % de la superficie del piso, y cuenta con cuatro crestas con altura de 1.4 m y ancho de 3.2 m. El invernadero está equipado con doble cristal y pantalla térmica, torre de enfriamiento, bomba de calor, switches hidráulicos, además de un tanque con agua para almacenamiento de energía con capacidad de 300 m<sup>3</sup>, el cual está cubierto de aislante para evitar la pérdida de calor.

Las plantas también funcionan como superficie de enfriamiento. Al transpirar la planta se enfría y el vapor de agua sube hacia el techo en donde se encuentran los intercambiadores de calor (en forma de tubos corrugados), ahí circula agua a temperatura de punto de rocío, produciendo la condensación del vapor. Debajo de los intercambiadores hay unos canalones en donde se recibe el agua de la condensación que se deriva a un tanque de recolección.

En este trabajo no se consideró la condensación en la superficie de la cubierta debido a que los intercambiadores de calor colocados bajo el techo logran captar la mayor parte del agua (Figura 2).





**Figure 2. Heat exchangers placed under the greenhouse roof.**

**Figura 2. Intercambiadores de calor colocados bajo el techo del invernadero.**

The condensation on the surface of the cover was not considered in this work since the heat exchangers placed under the ceiling capture most of the water (Figure 2).

The data used in this study were provided by staff at the Institute of Horticulture, Humboldt University of Berlin. The greenhouse has a weather station for measuring outside conditions, as well as a phytomonitoring system inside, where the main physiological variables are recorded every five minutes, such as transpiration, stomatal conductivity, photosynthesis, etc. Environmental variables such as temperature, relative humidity and  $\text{CO}_2$  concentration are recorded every 5 s with five sensors located at the ends and center of the greenhouse, and the measured values are averaged to obtain a datum every 30 s. The opening and closing of windows, as well as the maneuvering of the heating system, were obtained from greenhouse operation logbooks; for this, data from every 5 min, from January to September 2012, were used.

The model developed in this research is based on the one proposed by Bontsema et al. (2007), considering the specific case of a semi-closed greenhouse and the climatic conditions of the region.

**Model 1: behavior of the air humidity in the completely-closed greenhouse.**

In this dynamic model only transpiration and condensation processes were implemented.

The differential equation describing the absolute humidity of the air  $x_a$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) inside the greenhouse is as follows:

$$\frac{dx_a}{dt} = \frac{1}{h} [E - C] \quad (1)$$

where  $E$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is the plant transpiration,  $C$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is the condensation on the heat exchangers and  $h$  (m) is the height of the greenhouse.

The water vapor flux due to plant transpiration  $E$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is described in Equation 2:

Los datos utilizados en este estudio fueron proporcionados por personal del Instituto de Horticultura de la Universidad Humboldt de Berlín. El invernadero cuenta con una estación meteorológica para la medición de condiciones climatológicas externas; así como un sistema de fitomonitorio en el interior, en donde se registran las principales variables fisiológicas cada cinco minutos, tales como transpiración, conductividad estomatal, fotosíntesis, etc. Las variables ambientales como temperatura, humedad relativa y concentración de  $\text{CO}_2$  son registradas cada 5 s con cinco sensores ubicados en los extremos y centro del invernadero, y los valores medidos se promedian para obtener un dato cada 30 s. La apertura y cierre de ventanas, y la maniobra del sistema de calefacción, fueron obtenidos de las bitácoras de operación del invernadero; para esto se utilizaron datos de cada 5 min, de enero a septiembre de 2012.

El modelo desarrollado en esta investigación estuvo basado en el propuesto por Bontsema et al. (2007), considerando el caso particular de un invernadero semicerrado y las condiciones climáticas de la región.

**Modelo 1: comportamiento de la humedad del aire en el invernadero completamente cerrado.**

En este modelo dinámico únicamente se implementaron los procesos de transpiración y condensación.

La ecuación diferencial que describe a la humedad absoluta del aire  $x_a$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) en el interior del invernadero es la siguiente:

$$\frac{dx_a}{dt} = \frac{1}{h} [E - C] \quad (1)$$

donde  $E$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) es la transpiración de la planta,  $C$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) es la condensación en los intercambiadores de calor y  $h$  (m) es la altura del invernadero.

El flujo de vapor de agua debido a la transpiración en la planta  $E$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se describe en la Ecuación 2:

$$E = g_E (x_{crop} - x_a) \quad (2) \quad E = g_E (x_{crop} - x_a) \quad (2)$$

where  $g_E$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is the transpiration conductance,  $x_{crop}$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) is the water vapor concentration of the air at crop level and  $x_a$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) is the absolute humidity of the air inside the greenhouse.

The transpiration conductance  $g_E$  is defined as follows:

$$g_E = \frac{2LAI}{(1 + \varepsilon) r_b + r_s} \quad (3)$$

The ratio between latent heat and sensible heat content of saturated air  $\varepsilon$  (dimensionless) is determined in Equation 4:

$$\varepsilon = 0.7584 \exp(0.0518T_a) \quad (4)$$

The leaf boundary layer resistance  $r_b$  ( $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) and stomatal resistance  $r_s$  ( $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) are described in Equations 5 and 6:

$$r_b = \frac{1,174d^{0.5}}{(d | T_{int} - T_a | + 207\varphi_{wind}^2)^{0.25}} \quad (5)$$

$$r_s = 82 \left( \frac{4.3}{0.54} \right) \left[ \exp \left( \frac{-kR_n}{2LAI} \right) \right] (1 + 0.023 (T_a - 20)^2) \quad (6)$$

where  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) is the inside temperature,  $d$  (m) is the crop leaf length,  $T_{int}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) is the temperature of the heat exchanger,  $\varphi_{wind}$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is the wind speed inside the greenhouse and  $k$  ( $\text{J}\cdot\text{u}^{-1}$ ) is the radiation extinction coefficient.

The net radiation absorbed by the canopy  $R_n$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) is expressed as follows:

$$R_n = \tau (1 - \exp(-0.7LAI)) I_s \quad (7)$$

Where  $\tau$  (dimensionless) is the transitivity coefficient of the cover,  $LAI$  is the leaf area index (dimensionless) and  $I_s$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) is the solar radiation outside.

The water vapor concentration of the air at crop level  $x_{crop}$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) is given by the following Equation:

$$x_{crop} = x_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \quad (8)$$

where  $\lambda$  ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ) is the latent heat of vaporization of water, and the saturated water vapor concentration ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) is defined below:

$$x_a^* = 5.5638 \exp(0.0572T_a) \quad (9)$$

The absolute water vapor concentration of greenhouse air  $x_a$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) is a function of relative humidity (RH, %):

donde  $g_E$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) es la conductancia de la transpiración,  $x_{cultivo}$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) concentración de vapor de agua del aire en el cultivo y  $x_a$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) es la humedad absoluta del aire en el interior del invernadero.

La conductancia de la transpiración  $g_E$  se define de la siguiente manera:

$$g_E = \frac{2LAI}{(1 + \varepsilon) r_b + r_s} \quad (3)$$

La relación entre calor latente y contenido de calor sensible del aire saturado  $\varepsilon$  (adimensional) se determina en la Ecuación 4:

$$\varepsilon = 0.7584 \exp(0.0518T_a) \quad (4)$$

La resistencia de la capa límite de la hoja  $r_b$  ( $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ), y la resistencia estomática  $r_s$  ( $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) se describen en las Ecuaciones 5 y 6:

$$r_b = \frac{1,174d^{0.5}}{(d | T_{int} - T_a | + 207\varphi_{wind}^2)^{0.25}} \quad (5)$$

$$r_s = 82 \left( \frac{4.3}{0.54} \right) \left[ \exp \left( \frac{-kR_n}{2LAI} \right) \right] (1 + 0.023 (T_a - 20)^2) \quad (6)$$

donde  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) es la temperatura interna,  $d$  (m) la longitud de la hoja del cultivo,  $T_{int}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) es la temperatura del intercambiador de calor,  $\varphi_{wind}$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) es la velocidad del viento dentro del invernadero y  $k$  ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ) es el coeficiente de extinción de la radiación.

La radiación neta que absorbe el dosel  $R_n$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) se expresa de la siguiente manera:

$$R_n = \tau (1 - \exp(-0.7LAI)) I_s \quad (7)$$

donde  $\tau$  (adimensional) es el coeficiente de transividad de la cubierta,  $LAI$  es el índice del área foliar (adimensional) y  $I_s$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) es la radiación solar en el exterior.

La concentración de vapor de agua del aire en el cultivo  $x_{cultivo}$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) está dada por la siguiente Ecuación:

$$x_{cultivo} = x_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \quad (8)$$

donde  $\lambda$  ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ) es el calor latente de vaporización del agua, y la concentración de vapor de agua saturado  $x_a^*$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) se define a continuación:

$$x_a^* = 5.5638 \exp(0.0572T_a) \quad (9)$$

$$x_a = \frac{x_a^* RH}{100} \quad (10)$$

Finding the RH from Equation 10, and substituting with the expression  $x_a^*$  of Equation 9 results in:

$$RH = \frac{100x_a}{5.5638 \exp(0.0572T_a)} \quad (11)$$

where  $x_a$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) is calculated through differential Equation 1.

Condensation of water vapor occurs on heat exchangers; it is collected in gutters and taken to a tank, so that evaporation can be disregarded.

The mass flow of water vapor  $C$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in the greenhouse air due to condensation is:

$$C = g_c [0.2522 \exp(0.0485T_a)(T_a - T_{ext}) - (x_a^* - x_a)] \quad (12)$$

where  $T_{ext}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) is the outside air temperature and  $g_c$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is the condensation conductance, and it is calculated using the expression proposed by Van Beveren et al. (2014):

$$g_c \approx \max[0, 0.25 \cdot 10^3 (T_a - T_{int})^{1/3}] \quad (13)$$

After the implementation of this model, the parameters were calibrated; this involved minimizing the sum of the squares of the errors between the humidity values predicted by the model and those measured, subject to the restrictions of the upper and lower limits of the parameters. With this procedure it was possible to find optimal values of the parameters that generated a better model fit.

#### **Model 2: behavior of the air humidity in the semi-closed greenhouse with semi-closed windows.**

In this model the transpiration, ventilation and condensation processes were considered. The first two processes were modeled in the same way as in the previous case.

The water vapor flux due to ventilation  $V$  was modelled with the Equation of Bontsema et al. (2007):

$$V = g_v(x_a - x_{ext}) \quad (14)$$

where  $g_v$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is the condensation conductance and  $x_{ext}$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) is the absolute humidity of the outside air.

Following the model of Bontsema et al. (2007), the ventilation conductance is calculated as:

$$g_v = (\varphi_{ek} + \varphi_{win}) \quad (15)$$

La concentración absoluta de vapor de agua del aire en el invernadero  $x_a$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) está en función de la humedad relativa (RH, %):

$$x_a = \frac{x_a^* RH}{100} \quad (10)$$

Despejando la RH de la Ecuación 10, y sustituyendo con la expresión  $x_a^*$  de la Ecuación 9 se obtiene:

$$RH = \frac{100x_a}{5.5638 \exp(0.0572T_a)} \quad (11)$$

en donde  $x_a$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) es calculada a través de la Ecuación diferencial 1.

La condensación del agua se realiza en intercambiadores de calor; ésta se colecta en canalones y se lleva a un depósito, por lo que se desprecia la evaporación.

El flujo de masa de vapor de agua  $C$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) del aire al interior del invernadero debido a la condensación es:

$$C = g_c [0.2522 \exp(0.0485T_a)(T_a - T_{ext}) - (x_a^* - x_a)] \quad (12)$$

donde  $T_{ext}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) es la temperatura externa del aire y  $g_c$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) es la conductancia de la condensación, y se calcula utilizando la expresión propuesta por Van Beveren et al. (2014):

$$g_c \approx \max[0, 0.25 \cdot 10^3 (T_a - T_{int})^{1/3}] \quad (13)$$

Después de la implementación de este modelo se realizó la calibración de los parámetros; la cual consistió en minimizar la suma de los cuadrados de los errores entre los valores de humedad predichos por el modelo y los medidos, sujeto a las restricciones de los límites superior e inferior de los parámetros. Con este procedimiento se lograron encontrar valores óptimos de los parámetros que generaron un mejor ajuste del modelo.

#### **Modelo 2: comportamiento de la humedad del aire en el invernadero semicerrado con las ventanas semicerradas.**

En este modelo se consideraron los procesos de transpiración, condensación y ventilación. Los primeros dos se modelaron de la misma manera que en el caso anterior.

El flujo de vapor de agua debido a la ventilación  $V$  se modeló con la Ecuación de Bontsema et al. (2007):

$$V = g_v(x_a - x_{ext}) \quad (14)$$

donde  $g_v$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) es la conductancia de la condensación y  $x_{ext}$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) es la humedad absoluta del aire externo.

Siguiendo el modelo de Bontsema et al. (2007), la conductancia de la ventilación se calcula como:

The infiltration  $\varphi_{lek}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) is determined by the following Equation:

$$\varphi_{lek} = 0.000083 + 0.000035V_0 f_a \quad (16)$$

where  $V_0$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) is the initial wind speed, and for the purposes of this model  $V_0 = 1$  and  $f_a = 1$  is a dimensionless infiltration factor.

The ventilation through the windows is given by:

$$\varphi_{win} = \sqrt{\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2} \quad (17)$$

Where  $\varphi_{win}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) is the wind speed in the greenhouse expressed in Equation 18:

$$\varphi_{wind} = (f_{lsd} fr_{window_{lsd}} + f_{wsd} fr_{window_{wsd}}) V_0 L_1 L_2 \quad (18)$$

where  $L_1$  (m) is the length and  $L_2$  (m) the width of the window,  $fr_{window_{lsd}}$  ( $\text{m}^{-2}$ ) the number of windows for leeward ventilation per square meter of ground and  $fr_{window_{wsd}}$  ( $\text{m}^{-2}$ ) the number of windows for ventilation on the windward side.

The leeward ventilation  $f_{lsd}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) is determined in Equation 19:

$$f_{lsd} = c_{31} Ap_{lsd}^3 - c_{21} Ap_{lsd}^2 + c_{11} Ap_{lsd} + c_{01} \quad (19)$$

with  $c_{31}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{11}$  and  $c_{01}$  being empirical coefficients and  $Ap_{lsd}$  (dimensionless) is the number of leeward windows.

The windward ventilation  $f_{wsd}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) is:

$$f_{wsd} = c_{32} Ap_{wsd}^3 - c_{22} Ap_{wsd}^2 + c_{12} Ap_{wsd} + c_{02} \quad (20)$$

Likewise,  $c_{32}$ ,  $c_{22}$ ,  $c_{12}$  and  $c_{02}$  are empirical coefficients and  $Ap_{wsd}$  (dimensionless) is the number of windward windows.

Leeward ventilation due to the temperature difference  $\varphi_{dT_{lsd}}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) is determined as:

$$\varphi_{dT_{lsd}} = (1/3) a_1 L_1 \sqrt{g(1/283) |T_{ext} - T_a|} (fr_{window_{lsd}}) (L_{win_{lsd}})^{1.5} \quad (21)$$

where  $a_1$  (dimensionless) is a transport coefficient,  $g$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) the gravitational acceleration,  $T_{ext}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) the outside temperature and  $L_{win_{lsd}}$  (m) the length of the vertical opening of the window on the leeward side is described by the following Equation:

$$L_{win_{lsd}} = L_2 (\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{lsd}/100)\theta_{max})) \quad (22)$$

$\gamma$  (rad) is the slope of the roof and is given by Equation 23:

$$g_V = (\varphi_{lek} + \varphi_{win}) \quad (15)$$

La infiltración  $\varphi_{lek}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) se determina mediante la siguiente Ecuación:

$$\varphi_{lek} = 0.000083 + 0.000035V_0 f_a \quad (16)$$

donde  $V_0$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) es la velocidad inicial del viento, y para fines de este modelo  $V_0 = 1$  y  $f_a = 1$  es un factor de infiltración adimensional.

La ventilación a través de las ventanas está dada por:

$$\varphi_{win} = \sqrt{\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2} \quad (17)$$

Donde  $\varphi_{win}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) es la velocidad del viento dentro del invernadero expresada en la Ecuación 18:

$$\varphi_{wind} = (f_{lsd} fr_{window_{lsd}} + f_{wsd} fr_{window_{wsd}}) V_0 L_1 L_2 \quad (18)$$

donde  $L_1$  (m) es el largo y  $L_2$  (m) el ancho de la ventana,  $fr_{window_{lsd}}$  ( $\text{m}^{-2}$ ) el número de ventanas para la ventilación en sotavento por metro cuadrado de suelo y  $fr_{window_{wsd}}$  ( $\text{m}^{-2}$ ) el número de ventanas para la ventilación a barlovento.

La ventilación en sotavento  $f_{lsd}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) se determina en la Ecuación 19:

$$f_{lsd} = c_{31} Ap_{lsd}^3 - c_{21} Ap_{lsd}^2 + c_{11} Ap_{lsd} + c_{01} \quad (19)$$

siendo  $c_{31}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{11}$  y  $c_{01}$  coeficientes empíricos y  $Ap_{lsd}$  (adimensional) es el número de ventanas sotavento.

La ventilación en barlovento  $f_{wsd}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) es:

$$f_{wsd} = c_{32} Ap_{wsd}^3 - c_{22} Ap_{wsd}^2 + c_{12} Ap_{wsd} + c_{02} \quad (20)$$

Igualmente,  $c_{32}$ ,  $c_{22}$ ,  $c_{12}$  y  $c_{02}$  son coeficientes empíricos y  $Ap_{wsd}$  (adimensional) es el número de ventanas barlovento.

La ventilación en sotavento debida a la diferencia de temperatura  $\varphi_{dT_{lsd}}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) se determina como:

$$\varphi_{dT_{lsd}} = (1/3) a_1 L_1 \sqrt{g(1/283) |T_{ext} - T_a|} (fr_{window_{lsd}}) (L_{win_{lsd}})^{1.5} \quad (21)$$

donde  $a_1$  (adimensional) es un coeficiente de transporte,  $g$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) la aceleración de la gravedad,  $T_{ext}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) la temperatura externa y  $L_{win_{lsd}}$  (m) la longitud de la apertura vertical de la ventana en el lado de sotavento está descrita por la siguiente Ecuación:

$$L_{win_{lsd}} = L_2 (\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{lsd}/100)\theta_{max})) \quad (22)$$



$$\gamma_{rad} = (\pi/180)(\gamma) \quad (23)$$

$\theta_{max}$  (°) is the maximum opening angle of the window, and is determined as follows:

$$\theta_{max} = 50(2\pi) / 360 \quad (24)$$

Windward ventilation due to the temperature difference  $\varphi_{dT_{wsd}}$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) is given by:

$$\varphi_{dT_{wsd}} = (1/3)a_1L_1\sqrt{g(1/283)(T_{ext} - T_a)(fr_{window_{wsd}})(L_{win_{wsd}})^{1.5}} \quad (25)$$

The length of the vertical opening of the window on the windward side  $L_{win_{wsd}}$  (m) is described in Equation 26:

$$L_{win_{wsd}} = L_2(\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{wsd}/100)\theta_{max})) \quad (26)$$

The model was implemented in the MATLAB®/Simulink environment, which has a main program where the parameters, input variables and simulation options are defined, and a Simulink file where the model equations are implemented. The fourth-order Runge-Kutta method with ode45 integration variable step size, with a tolerance of  $1 \times 10^{-10}$ , was used.

## Results and discussion

### Model 1: behavior of the air humidity in the closed greenhouse.

The initial values of the parameters used in this model were: 1) coefficient of the volume of air inside the greenhouse relative to the area thereof ( $H = 6.7$  m) (data from the greenhouse under study), 2) leaf boundary layer resistance ( $r_b = 200 \text{ s} \cdot m^{-1}$ ) (Bontsema, et al. 2007), 3) radiation extinction coefficient ( $k = 0.8$ ) (Carranza, Lanchero, Miranda, Salazar, & Chaves, 2008) and 4) light transmissivity ( $\tau = 0.7$ ) (Van Beveren et al., 2014). The results of the model's implementation are shown in Figure 3, where overestimation and underestimation of the measured humidity can be seen. There is a poor fit of the measured to estimated values, so we proceeded to the calibration of the parameters to improve model performance.

Since the model has four parameters, the sensitivity analysis was omitted and we proceeded to calibrate the following: coefficient of the volume of air inside the greenhouse relative to the area thereof ( $H$ ), leaf boundary layer resistance ( $r_b$ ), radiation extinction coefficient ( $k$ ) and light transmissivity ( $\tau$ ).

The calibration results are shown in Table 1, which has the initial and final fit measurements and the values of the parameters in both cases. It should be noted that we used different variation ranges, which were within

$\gamma$  (rad) (rad) es la pendiente del techo y está dada por la Ecuación 23:

$$\gamma_{rad} = (\pi/180)(\gamma) \quad (23)$$

$\theta_{max}$  (°) es el ángulo máximo de apertura de la ventana, y está determinado de la siguiente manera:

$$\theta_{max} = 50(2\pi) / 360 \quad (24)$$

La ventilación en el barlovento debida a la diferencia de temperatura  $\varphi_{dT_{wsd}}$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) está dada por:

$$\varphi_{dT_{wsd}} = (1/3)a_1L_1\sqrt{g(1/283)(T_{ext} - T_a)(fr_{window_{wsd}})(L_{win_{wsd}})^{1.5}} \quad (25)$$

La longitud de la apertura vertical de la ventana, en el lado de barlovento  $L_{win_{wsd}}$  (m) esta descrita en la Ecuación 26:

$$L_{win_{wsd}} = L_2(\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{wsd}/100)\theta_{max})) \quad (26)$$

El modelo se implementó en el ambiente MATLAB®/SIMULINK; el cual tiene un programa principal donde se definen los parámetros, las variables de entrada y las opciones de simulación, y un archivo SIMULINK donde se implementan las ecuaciones del modelo. Se utilizó el método de Runge-Kutta de cuarto orden con tamaño de paso de integración variable ode45, con una tolerancia de  $1 \times 10^{-10}$ .

## Resultados y discusión

### Modelo 1: comportamiento de la humedad del aire en el invernadero cerrado.

Los valores iniciales de los parámetros utilizados en este modelo fueron: 1) coeficiente del volumen del aire dentro del invernadero respecto de la superficie del mismo ( $H = 6.7$  m) (datos del invernadero bajo estudio), 2) resistencia de la capa límite de la hoja ( $r_b = 200 \text{ s} \cdot m^{-1}$ ) (Bontsema, et al. 2007), 3) coeficiente de extinción de la radiación ( $k = 0.8$ ) (Carranza et al., 2008) y 4) transmisividad de la luz ( $\tau = 0.7$ ) (Van Beveren et al., 2014). Los resultados de la implementación del modelo se muestran en la Figura 3; donde se presenta sobreestimación y subestimación de la humedad medida, existe un pobre ajuste de lo medido respecto de lo estimado, por lo que se procedió a realizar la calibración de los parámetros para mejorar el desempeño del modelo.

Dado que el modelo tiene cuatro parámetros, se omitió el análisis de sensibilidad y se procedió a calibrar los siguientes: coeficiente del volumen del aire dentro del invernadero respecto de la superficie del mismo ( $H$ ), resistencia de la capa límite de la hoja ( $r_b$ ), coeficiente de extinción de la radiación ( $k$ ) y transmisividad de la luz ( $\tau$ ).

the range reported in the literature. The best result obtained is reported in Table 1.

Once the optimal values were obtained, running the model resulted in a better fit, as seen in Figure 4.

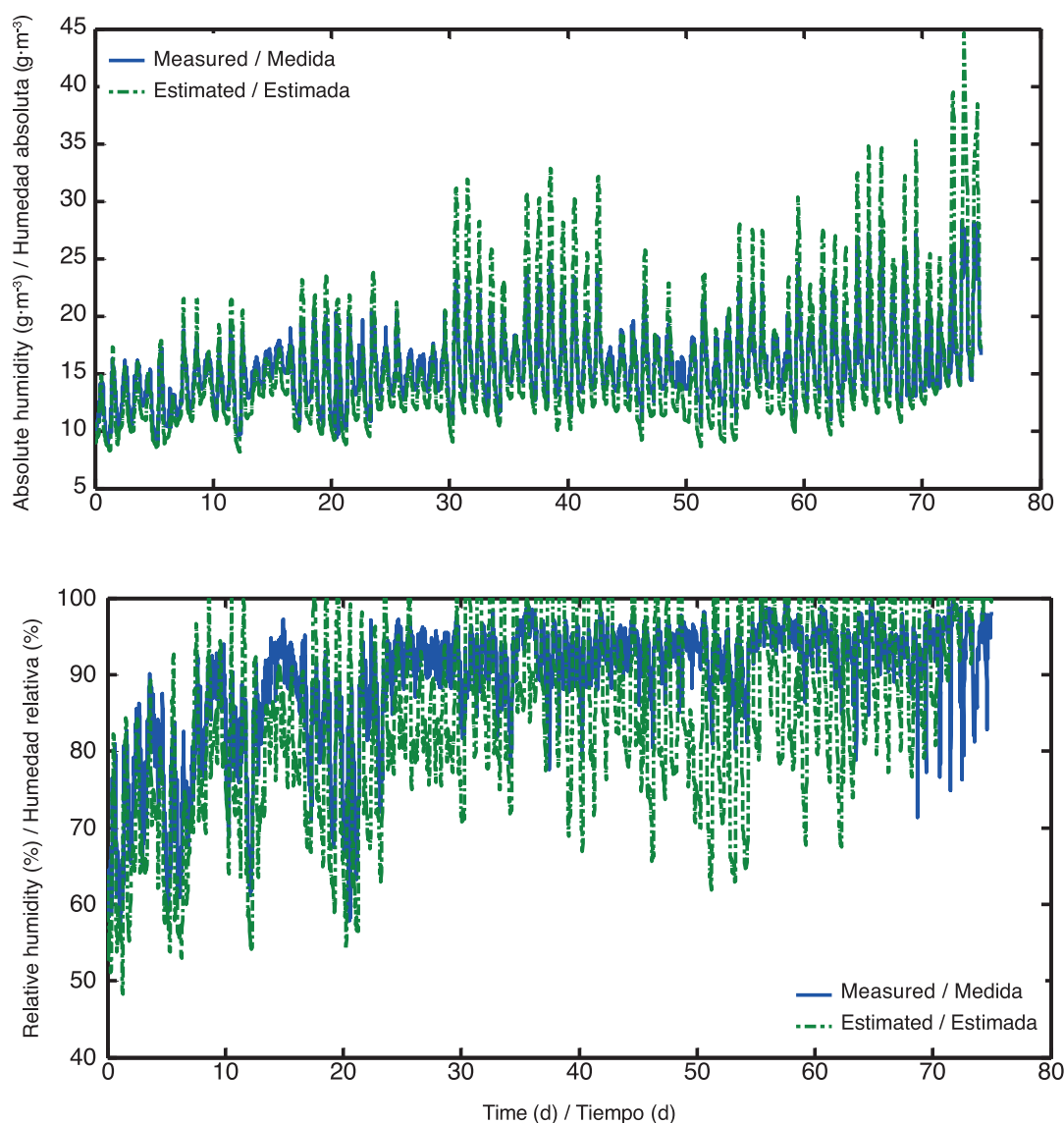
There is no appreciable difference between Figure 3 and Figure 4 due to the amount of data considered in the simulation of model 1; therefore, a new run of the calibrated model was performed for two arbitrarily-chosen days, in order to observe the fit achieved (Figures 5).

Considering the above results, it can be seen that the simulations of the completely closed greenhouse

Los resultados de la calibración se presentan en el Cuadro 1, en donde se tienen las medidas de ajuste inicial y final, así como los valores de los parámetros en ambos casos. Cabe señalar que se utilizaron diferentes rangos de variación considerando que estuvieran dentro del rango reportado en la literatura. En el Cuadro 1 se reporta el mejor resultado obtenido.

Una vez obtenidos los valores óptimos se realizó la corrida del modelo teniendo como resultado un mejor ajuste, tal como se observa en la Figura 4.

No se aprecia la diferencia entre la Figura 3 respecto de la Figura 4 debido a la cantidad de datos considerados en la simulación del modelo 1; por lo que se realizó



**Figure 3. Absolute and relative humidity values, measured (blue) and estimated (green) with parameters reported in the literature (from February 15 to April 29, 2012).**

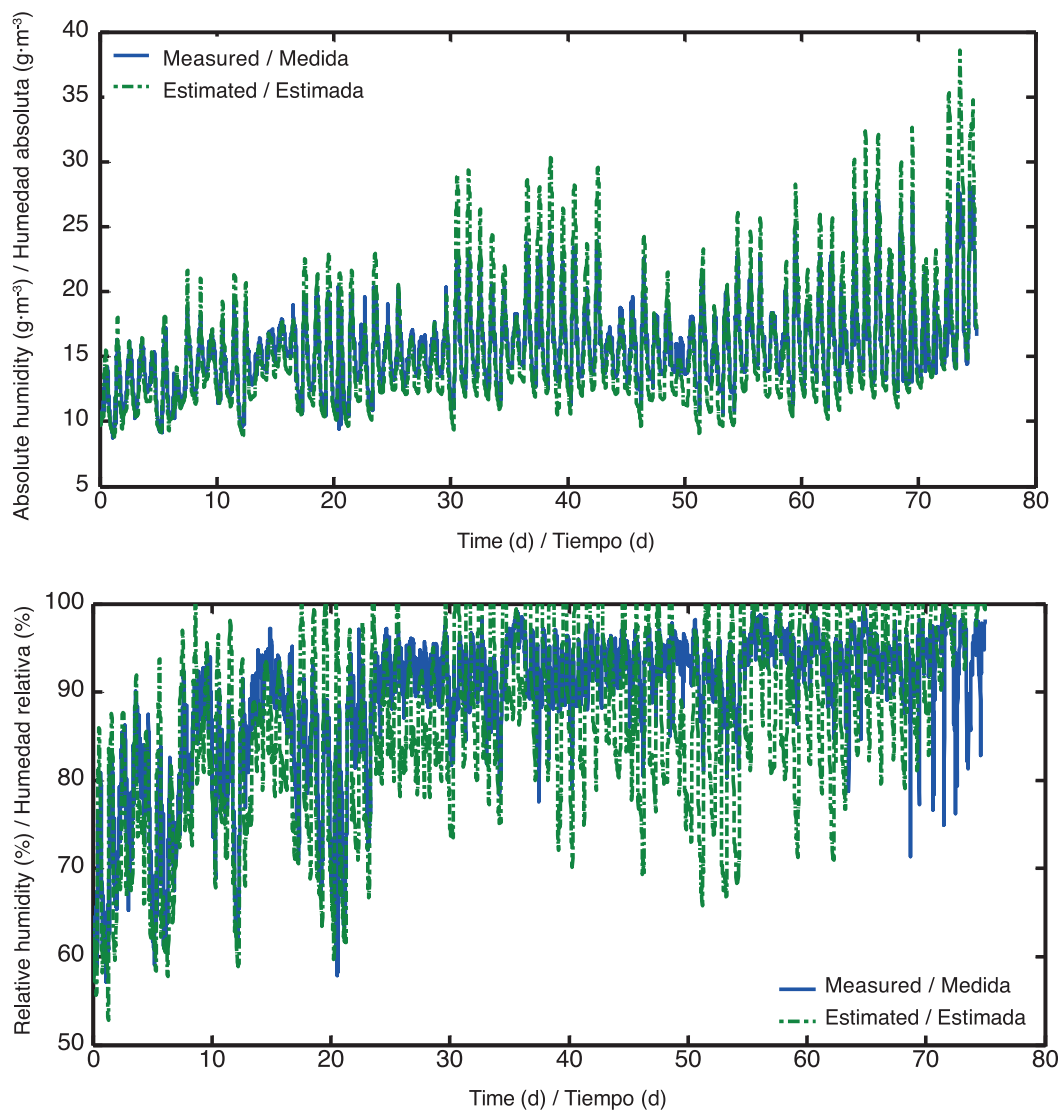
**Figura 3. Valores de humedad absoluta y relativa, medidos (azul) y estimados (verde) con parámetros reportados en la literatura (del 15 de febrero al 29 de abril de 2012).**

**Table 1. Fit measures and optimal values of the parameters after calibration of model 1.****Cuadro 1. Medidas de ajuste y valores óptimos de los parámetros después de la calibración del modelo 1.**

Initial value/ Valor inicial	Initial fit measures/ Medidas de ajuste inicial	Variation range/ Rango de variación	Value after calibration/ Valor después de la calibración	Final fit measures/ Medidas de ajuste final
	MSE = 15.3466			MSE = 10.0388
$H = 6.7$	RMSE = 3.9175	$5 \leq H \leq 10$	$H = 5$	RMSE = 3.1684
$r_b = 200$	MAE = 2.4829	$100 \leq r_b \leq 200$	$r_b = 100$	MAE = 1.9413
$k = 0.8$	$r^2 = 0.7041$	$0 \leq k \leq 0.8$	$k = 0.4$	$r^2 = 0.7716$
$\tau = 0.7$	$r = 0.839$	$0.6 \leq \tau \leq 0.8$	$\tau = 0.7$	$r = 0.8784$
	RMAE = 0.1235			RMAE = 0.1016

MSE = mean squared error, RMSE = root mean squared error, MAE = mean absolute error,  $r^2$  = coefficient of determination,  $r$  = correlation coefficient, RMAE = relative mean absolute error.

MSE = error cuadrado medio, RMSE = raíz del error cuadrado medio, MAE = error absoluto medio,  $r^2$  = coeficiente de determinación,  $r$  = coeficiente de correlación, RMAE = error absoluto medio relativo.

**Figure 4. Absolute and relative humidity values, measured (blue) and estimated (green) with optimal parameters after calibration of the model.****Figura 4. Valores de humedad absoluta y relativa, medidos (azul) y estimados (verde) con parámetros óptimos después de la calibración del modelo.**

model have good approximation to measures at certain periods, whereas deviation is important for large humidity values.

**Model 2: behavior of the air humidity in the semi-closed greenhouse when the windows are open.**

For this model the processes of transpiration, ventilation and condensation were considered. To implement the third one, a sub-model of the specific ventilation was generated; this is joined by a subroutine to the main program of model 2.

The initial values of the parameters were: latent heat of vaporization of water ( $\lambda = 2,540 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ) (Van Beveren et al., 2014), radiation extinction coefficient ( $k = 0.8$ ) (Carranza et al., 2008), window length ( $L_1 = 3.2 \text{ m}$ ), number of windows ( $n_v = 20$ ), greenhouse ground area ( $A_s = 307.2 \text{ m}^2$ ), window width ( $L_2 = 0.8 \text{ m}$ ), leaf boundary layer resistance ( $r_b = 200$ ) (Bontsema, et al. 2007), roof slope ( $\gamma = 24.9^\circ$ ) and light transmissivity ( $\tau = 0.7$ ) (Van Beveren et al., 2014). For the dimension values, the data from the greenhouse under study were used.

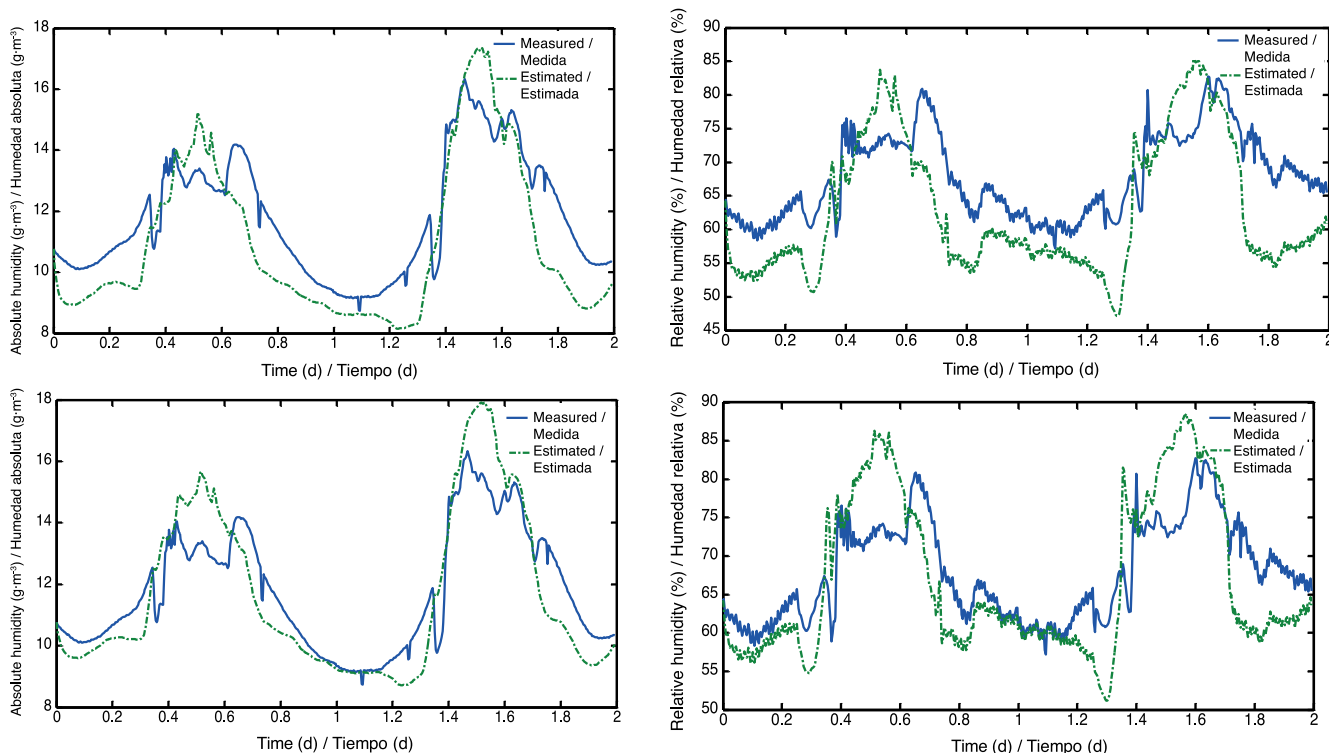
una nueva corrida del modelo calibrado para dos días elegidos de manera arbitraria, con la finalidad de observar el ajuste logrado (Figuras 5).

Considerando los resultados anteriores, se observa que las simulaciones del modelo del invernadero totalmente cerrado tienen buena aproximación a las mediciones en ciertos periodos; mientras que la desviación es importante para valores grandes de la humedad.

**Modelo 2: comportamiento de la humedad del aire en el invernadero semicerrado cuando las ventanas están abiertas**

Para este modelo se consideraron los procesos de transpiración, condensación y ventilación. Para la implementación del tercero se generó un submodelo de la ventilación específica, este está incorporado mediante una subrutina al programa principal del modelo 2.

Los valores iniciales de los parámetros fueron: calor latente de vaporización del agua ( $\lambda = 2,540 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ) (Van Beveren et al., 2014), coeficiente de extinción de la radiación ( $k = 0.8$ ) (Carranza et al., 2008), longitud de la ventana ( $L_1 = 3.2 \text{ m}$ ), número de ventanas ( $n_v = 20$ ),



**Figure 5. Values of absolute humidity (left) before and after calibration, and relative humidity (right) before and after calibration (February 15 and 16, 2012).**

**Figura 5. Valores de humedad absoluta (izquierda), antes y después de la calibración, y relativa (derecha), antes y después de la calibración (15 y 16 de febrero de 2012).**



The simulation results and the parameters obtained from the literature are presented in Figure 6.

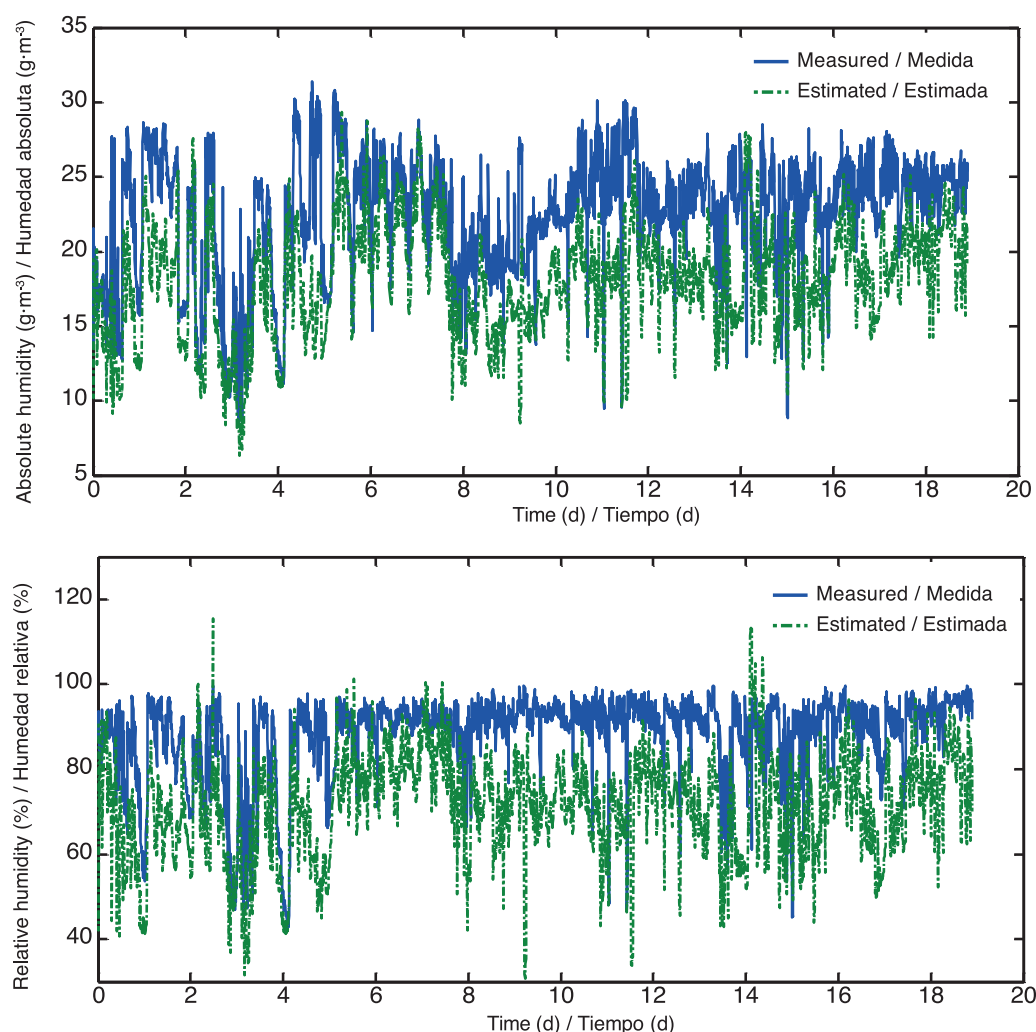
It can be seen in Figure 6 that the model overestimates and underestimates the humidity inside the greenhouse. Since there is a greater number of parameters in this model, sensitivity analysis (Table 2), which aims to assess the relative importance of the parameters and constants on the evolution over time of the state variables and outputs (Saltelli et al., 2000), was performed; for this reason the dimensions of the greenhouse were included. Using the already calibrated values in Table 3, model 2 was implemented, resulting in a better performance of the estimation of the model with respect to the measures (Figure 7).

In order to observe in greater detail the fit that was achieved after calibration, the model was implemented for seven days (Figures 8).

área del suelo del invernadero ( $A_s = 307.2 \text{ m}^2$ ), ancho de la ventana ( $L_2 = 0.8 \text{ m}$ ), resistencia de la capa límite de la hoja ( $r_b = 200$ ) (Bontsema, et al. 2007), pendiente del techo ( $\gamma = 24.9^\circ$ ) y transmisividad de la luz ( $\tau = 0.7$ ) (Van Beveren et al., 2014). Para los valores de las dimensiones se utilizaron los datos del invernadero bajo estudio.

Los resultados de la simulación y los parámetros obtenidos de la literatura se presentan en la Figura 6.

En la Figura anterior se observa que el modelo sobreestima y subestima la humedad dentro del invernadero. Debido a que en este modelo existe mayor número de parámetros se realizó el análisis de sensibilidad (Cuadro 2), cuyo objetivo es evaluar la importancia relativa que tienen los parámetros y constantes, sobre la evolución en el tiempo de las variables de estado y las salidas (Saltelli et al., 2000); por esta razón se incluyeron las dimensiones del invernadero.



**Figure 6. Values of absolute and relative humidity, measured (blue) and estimated (green) with parameters reported in the literature of model 2 (from March 9 to July 4, 2012).**

**Figura 6. Valores de humedad absoluta y relativa, medidos (azul) y estimados (verde) con parámetros reportados en la literatura del modelo 2 (de 9 de marzo al 4 de julio de 2012).**

**Table 2. Values of the sensitivity indices for parameters  $\lambda$ ,  $k$ ,  $L_1$ ,  $n_v$ ,  $A_s$ ,  $L_2$ ,  $r_b$ ,  $\gamma$  and  $\tau$ .****Cuadro 2. Valores de los índices de sensibilidad para los parámetros  $\lambda$ ,  $k$ ,  $L_1$ ,  $n_v$ ,  $A_s$ ,  $L_2$ ,  $r_b$ ,  $\gamma$  y  $\tau$ .**

Parameter/Parámetro	Sensitivity indices / Índices de sensibilidad		
	Relative sensitivity index of absolute humidity / Relativa de la humedad absoluta	Relative sensitivity index of relative humidity / Relativa de la humedad relativa	Absolute sensitivity index of absolute humidity / Absoluta de la humedad absoluta
$\lambda$	$1.3721 \times 10^{11}$	$1.3721 \times 10^{11}$	$1.1112 \times 10^9$
$k$	$5.2802 \times 10^4$	$5.2802 \times 10^4$	$1.3437 \times 10^8$
$L_1$	$3.0172 \times 10^4$	$3.0172 \times 10^4$	$1.8261 \times 10^5$
$n_v$	$3.0172 \times 10^4$	$3.0172 \times 10^4$	$2.9218 \times 10^4$
$A_s$	$3.0172 \times 10^4$	$3.0172 \times 10^4$	$1.9022 \times 10^3$
$L_2$	$1.6123 \times 10^4$	$1.6123 \times 10^4$	$3.8178 \times 10^5$
$r_b$	$1.3671 \times 10^4$	$1.3671 \times 10^4$	$2.4836 \times 10^3$
$\gamma$	486.0123	486.0123	404.1606
$\tau$	6.2290	6.2290	$1.6065 \times 10^4$

The calibration results of the model are displayed in Table 3, for which the most sensitive parameters ( $\lambda$ ,  $k$ ,  $L_1$ ,  $n_v$ ,  $A_s$ ,  $L_2$  and  $r_b$ ) were used.

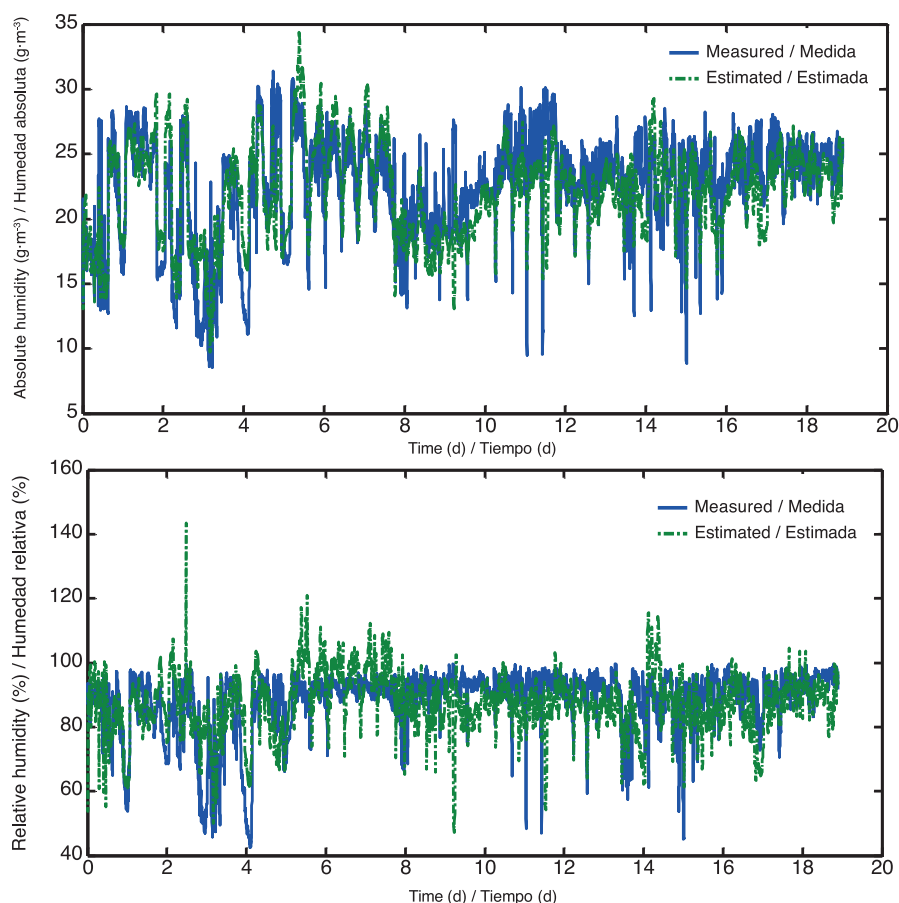
Los resultados de calibración del modelo se despliegan en el Cuadro 3, para la cual se emplearon los parámetros más sensibles ( $\lambda$ ,  $k$ ,  $L_1$ ,  $n_v$ ,  $A_s$ ,  $L_2$  y  $r_b$ ).

**Table 3. Fit measures and optimal values of the parameters after calibration of model 2.****Cuadro 3. Medidas de ajuste y valores óptimos de los parámetros después de la calibración del modelo 2.**

Nominal Value / Valor nominal	Initial fit measures / Medidas de ajuste inicial	Variation range / Rango de variación	Optimal values after calibration / Valor óptimos después de la calibración	Final fit measures / Medidas de ajuste final
$\lambda = 2,540$		$1016 \leq \lambda \leq 2540$	$\lambda = 2,539.6$	
$k = 0.7$	MSE = 27.9974	$0.665 \leq k \leq 0.7$	$k = 0.7$	MSE = 8.0729
$L_1 = 3.2$	RMSE = 5.2913	$1.28 \leq L_1 \leq 3.2$	$L_1 = 1.3$	RMSE = 2.8413
$n_v = 20$	MAE = 4.5210	$16 \leq n_v \leq 20$	$n_v = 16.6$	MAE = 2.1946
$A_s = 307.2$	$r^2 = -0.5331$	$291.84 \leq A_s \leq 307.2$	$A_s = 307.2$	$r^2 = 0.7278$
$L_2 = 0.8$	$r = 0.73$	$0.64 \leq L_2 \leq 0.8$	$L_2 = 0.7$	$r = 0.8531$
$r_b = 150$	RMAE = 0.202	$100 \leq r_b \leq 200$	$r_b = 92.5$	RMAE = 0.0977

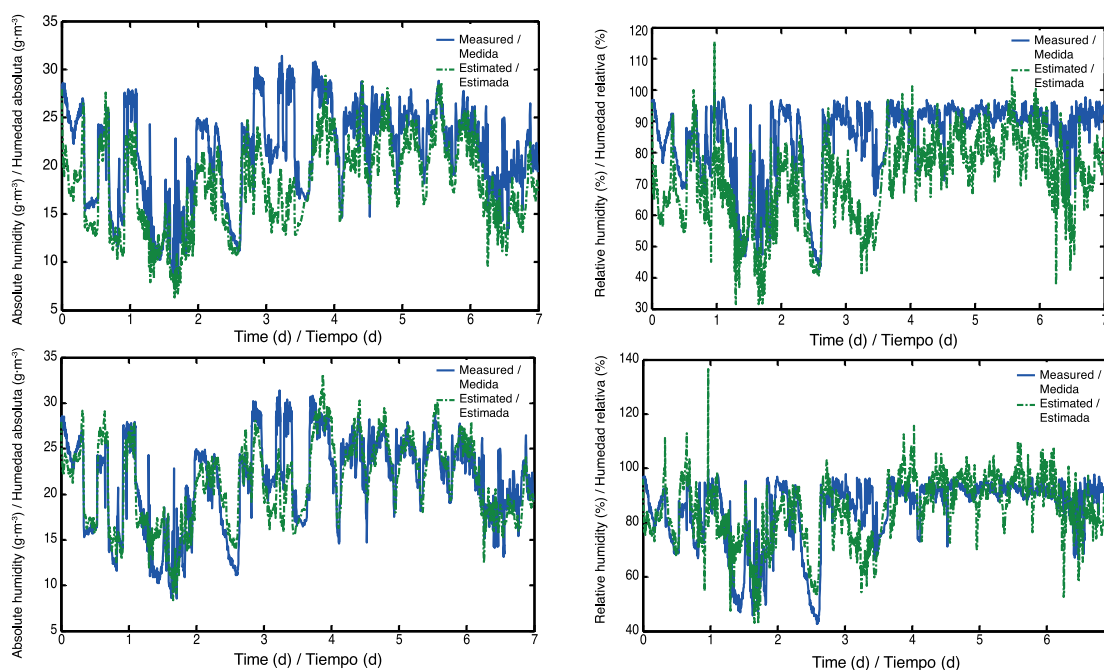
MSE = mean squared error, RMSE = root mean squared error, MAE = mean absolute error,  $r^2$  = coefficient of determination,  $r$  = correlation coefficient, RMAE = relative mean absolute error.

MSE = error cuadrado medio, RMSE = raíz del error cuadrado medio, MAE = error absoluto medio,  $r^2$  = coeficiente de determinación,  $r$  = coeficiente de correlación, RMAE = error absoluto medio relativo.



**Figure 7. Absolute and relative humidity values, measured (blue) and estimated (green) with optimal parameters after calibration of model 2.**

**Figura 7. Valores de humedad absoluta y relativa, medidos (azul) y estimados (verde) con parámetros óptimos después de la calibración del modelo 2.**



**Figure 8. Values of absolute humidity (left) before and after calibration, and relative humidity (right) before and after calibration (considering seven days in May 2012).**

**Figura 8. Valores de humedad absoluta (izquierda), antes y después de la calibración, y relativa (derecha), antes y después de la calibración (considerando 7 días de mayo de 2012).**

## Conclusions

In the first dynamic model, calibration of the height of the greenhouse ( $H$ ), which measured 6.7 m up to the ridge, and decreased to 5 m, was performed. This means that the greenhouse is oversized, with a height greater than needed to perform its functions.

The aerodynamic resistance ( $r_b$ ) reported in the literature was  $200 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  (used as the upper limit in the calibration) and after calibration an  $r_b = 100 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  was obtained, meaning that the lower the boundary layer resistance, the higher the transpiration rate. The radiation extinction coefficient ( $k$ ) decreased by half after calibration; that is, the amount of radiation captured by the canopy up until reaching the lower foliage layers was lower, perhaps because in a semi-closed greenhouse there are major obstacles for the radiation to pass, such as sensors and heat exchangers placed among the foliage. Finally, the transmissivity coefficient of the cover  $\tau = 0.7$  (reported for a glass greenhouse by Van Beveren et al., 2014) did not present variation after calibration, which is congruent, since the conditions of the Netherlands and Germany are not very different in terms of geographical location, and greenhouse type and management. After calibration of model 1, it was possible to reduce the MAE from 2.4829 to 1.9413, and  $r$  increased from 0.839 to 0.8784.

In the second model, the calibration result showed that the latent heat of vaporization of water ( $\lambda$ ) and the radiation extinction coefficient ( $k$ ) remained constant. This coefficient is related to the inclination angle of the leaves and provides information on how efficient the plant is in intercepting solar radiation. In this sense, model 2 is more efficient, perhaps due to the movement of the leaves that allows radiation penetration. The length, width and number of windows decreased after calibration, which means that the ventilation area can be reduced. Also,  $r_b$  decreased from 150 to 92.5, lower than the value found for model 1, which is reasonable since ventilation decreases aerodynamic resistance.

After calibration of model 2, it was possible to reduce the MAE from 4.52 to 2.19 and  $r$  increased from 0.73 to 0.8531.

Both models were able to detect the parameters and constants involved in the water balance.

Utilizando los valores ya calibrados del Cuadro 3 se implementó el modelo 2, teniendo como resultado un mejor ajuste de la estimación del modelo con respecto de las mediciones (Figura 7).

Con la finalidad de observar a mayor detalle el ajuste que se logró después de la calibración se implementó el modelo para siete días (Figuras 8).

## Conclusiones

En el primer modelo dinámico se realizó la calibración de la altura del invernadero ( $H$ ); el cual mide 6.7 m hasta la cresta, y disminuyó a 5 m. Lo que significa que el invernadero se encuentra sobredimensionado, con altura mayor a la necesaria para llevar a cabo sus funciones.

La resistencia aerodinámica ( $r_b$ ) reportada en la literatura fue de  $200 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  (utilizado como límite superior en la calibración) y después de la calibración se obtuvo una  $r_b = 100 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ ; lo que implica que a menor resistencia de la capa límite, mayor es la tasa de transpiración. El coeficiente de extinción de la radiación ( $k$ ) disminuyó a la mitad después de la calibración; es decir, la cantidad de radiación captada por el dosel hasta llegar a las capas inferiores del follaje fue menor, quizás debido a que en un invernadero semicerrado se tienen mayores obstáculos para dejar pasar la radiación, como los sensores e intercambiadores de calor colocados entre el follaje. Por último, el coeficiente de transmisividad de la cubierta  $\tau = 0.7$  (reportado para un invernadero de cristal por Van Beveren et al., 2014) no presentó variación después de la calibración, lo cual es congruente, ya que las condiciones de Holanda y Alemania no son muy diferentes en cuanto a la situación geográfica, tipo y manejo del invernadero. Después de la calibración del modelo 1 se logró disminuir el MAE de 2.4829 a 1.9413, y el  $r$  aumentó de 0.839 a 0.8784.

En el segundo modelo, el resultado de la calibración mostró que el calor latente de vaporización del agua ( $\lambda$ ) y el coeficiente de extinción de la radiación ( $k$ ) permanecieron constantes. Este coeficiente se relaciona con el ángulo de inclinación de las hojas y provee información de qué tan eficiente es la planta en interceptar la radiación solar. En este sentido, el modelo 2 es más eficiente, quizás por el movimiento de las hojas que permite la penetración de la radiación. El largo, ancho y número de ventanas disminuyeron después de la calibración, lo cual significa que se puede reducir el área de ventilación. Asimismo, la  $r_b$  disminuyó de 150 a 92.5, menor al valor encontrado para el modelo 1, lo cual es razonable ya que con la ventilación se disminuye la resistencia aerodinámica.

*End of English version*



## References / Referencias

- Baptista, F. J., Bailey, B. J., Randall, J. M., & Meneses, J. F. (1999). Greenhouse ventilation rate: theory and measurement with tracer gas techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(4), 363-374. doi: 10.1006/jaer.1998.0381
- Bontsema, J., Hemming, J., Stanghellini, C., de Visser, P., Van Henten, E. J., Budding, J., Rieswijk, T., & Nieboer, S. (2007). On-line monitorig van transpiratie en fotosynthese activiteit. Nota 451. Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen, The Netherlands. 78 p.
- Boulard, T., & Wang, S. (2000). Greenhouse crop transpiration model from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(1), 235-244. doi: 10.1016/S0168-1923(99)00082-9
- Carranza, C., Lanchero, O., Miranda, D. S., Salazar, M. R., & Chaves, B. (2008). Modelo simple de simulación de distribución de masa seca en brócoli (*Brassica* sp.) variedad Coronado y repollo (*Brassica oleracea*) híbrido Delus cultivados en la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 26(1), 23-31.
- Jolliet, O., & Bailey, B. J. (1992). The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58(1-2), 43-62. doi: 10.1016/0168-1923(92)90110-P
- Jolliet, O. (1994). HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57(1), 23-37. doi: 10.1006/jaer.1994.1003
- Después de la calibración del modelo 2 se logró disminuir el MAE de 4.52 a 2.19 y el *r* aumento de 0.73 a 0.8531.
- En ambos modelos se lograron detectar los parámetros y constantes que intervienen en el balance de humedad.

### Fin de la versión en español

- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(3), 177-183. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/3535/353531987011.pdf>
- Saltelli, A., Chan, K., & Scott, E. M. (2000). *Sensitivity Analysis*. Chichester: John Wiley & Sons LTD.
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management*. The Netherlands: Agricultural University, Wageningen.
- Stanghellini, C., & de Jong, T. (1995). A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76(2), 129-148. doi: 10.1016/0168-1923(95)02220-R
- Van Beveren, P. J. M., Bontsema, J., Van Straten, G., & Van Henten, E. J. (2014). Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse. *Applied energy*, 137(1), 97-109. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.083