



MODELADO Y SIMULACIÓN
DE LA TEMPERATURA Y
HUMEDAD RELATIVA AL
INTERIOR DE UNA CÁMARA
DE CRECIMIENTO





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

“FRANCISCO GARCÍA SALINAS”

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DOCTORADO EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA

TESIS DOCTORAL

**Modelado y simulación de la temperatura y
humedad relativa al interior de una cámara de
crecimiento.**

Autor:

M.Sc. Germán Díaz Flórez

Directores:

Dr. Carlos Alberto Olvera Olvera

Dr. Luís Octavio Solís Sánchez

Zacatecas, Zac., Diciembre del 2019



DOCTORADO EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA

**DRA. SAMANTA DECIRE BERNAL AYALA
COORDINADORA DEL DEPARTAMENTO
ESCOLAR CENTRAL DE LA UAZ
PRESENTE.**

Por medio de la presente hacemos de su conocimiento que la tesis "Modelado y simulación de la temperatura y humedad relativa al interior de una cámara de crecimiento" ya fue revisada y aprobada para su impresión, misma que desarrolló la alumno **Germán Díaz Florez**, con número de matrícula **33147876**, del de Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

Por lo anteriormente expuesto solicitamos se de trámite para que el alumno pueda obtener el acuerdo correspondiente.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

Zacatecas, Zac., a 27 de Noviembre de 2019



**DR. CARLOS ALBERTO OLVERA
OLVERA
REVISÓ Y APROBÓ**



**DR. LUIS OCTAVIO SOLÍS
SÁNCHEZ
REVISÓ Y APROBÓ**



**DOCTORADO EN INGENIERÍA
Y TECNOLOGÍA APLICADA**



DOCTORADO EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Zacatecas, Zac; miércoles, 27 de noviembre de 2019

M.Sc. Germán Díaz Flórez
Alumno de Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada
PRESENTE

En respuesta a su solicitud para la asignación del proyecto que deberá desarrollar como tesis para obtener el grado de **"Doctor en ingeniería y tecnología aplicada"**, manifiesto lo siguiente:

Con esta fecha, el C. Dr. Luis Solís Sánchez, Responsable del Programa de Posgrado de Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada fijó a usted el siguiente

TEMA DE TESIS

"Modelado y simulación de la temperatura y humedad relativa al interior de una cámara de crecimiento"

Lo que comunico a usted para su conocimiento, manifestándole que, para la presentación de la tesis, ésta no deberá ser impresa hasta tanto no envíe el documento para ser revisado por la comisión que se nombre en su oportunidad para la aprobación del mismo, o en su caso la indicación de correcciones pertinentes.

ATENTAMENTE


Dr. Jorge de la Torre y Ramos
Director de la unidad Académica de Ingeniería Eléctrica

UNIDAD ACADÉMICA
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
U . A . Z .

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS "FRANCISCO GARCÍA SALINAS"

Av. Ramón López Velarde #801, Col. Centro, Zacatecas, Zac. C.P. 98060, Tel. (492)92-56690 Ext. 3967
Correo Electrónico: alitzai@uaz.edu.mx



DOCTORADO EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA

M.Sc. Germán Díaz Flórez

PRESENTE

La Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, a través del Posgrado de Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, comunica a usted que la comisión revisora integrada por:

Dr. Carlos Alberto Olvera Olvera

Dr. Luis Octavio Solís Sánchez

Dr. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel

Dr. Héctor Alonso Guerrero Osuna

Dr. Héctor Gutiérrez Bañuelos

Revisó y aprobó el trabajo de tesis **"Modelado y simulación de la temperatura y humedad relativa al interior de una cámara de crecimiento"**

Por lo que está usted facultado por el Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada para imprimirlo y realizar los trámites necesarios ante la Rectoría de la Universidad Autónoma de Zacatecas, para la realización del examen de grado.

Zacatecas, Zacatecas, a 27 de Noviembre de 2019

ATENTAMENTE

**DR. LUIS OCTAVIO SOLÍS SÁNCHEZ
RESPONSABLE DEL DOCTORADO EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA**



**DOCTORADO EN INGENIERÍA
Y TECNOLOGÍA APLICADA (I)**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS "FRANCISCO GARCÍA SALINAS"

Av. Ramón López Velarde #801, Col. Centro, Zacatecas, Zac. C.P. 98060, Tel. (492)92-36690 Ext. 3967

Correo Electrónico: dita@uaz.edu.mx

Dedicado a,

A mis padres, a los que debo todo.

*A Anel, y a mis hijos Humberto y Julieta, por su infinita
paciencia, y por el tiempo que no compartimos.*

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Zacatecas, a través de la unidad de Ingeniería Eléctrica, por ser la institución que me dio la oportunidad de realizar estudios de postgrado a través del Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada.

Al Dr. Carlos Olvera Olvera, al Dr. Luis Octavio Solís Sánchez, al Dr. Jorge Mendiola Santibáñez, a la Dra. Ma. Araiza, al Dr. Héctor Gutiérrez Bañuelos, al Dr. Héctor Guerrero Ozuna, al Mtro. Santiago Villagrana Barraza.

Gracias también a todas las personas que de una u otra forma han ayudado en su momento a que este proyecto continuará y llegará a buen fin.

A mis amigos y familiares.

RESUMEN

El modelado y la simulación de variables internas como la temperatura y la humedad relativa son relevantes para diseñar futuros sistemas de control climático. En este trabajo, se propone un modelo matemático para predecir las variables internas de temperatura (T) y humedad relativa (HR) de una cámara de crecimiento (CC). La CC integra el concepto de energías renovables porque cuenta con tecnología que aprovecha los recursos naturales para su funcionamiento. Esta cámara se instaló en una granja en Querétaro, México, en las coordenadas 20.549278 Lat., -100.503250 Long. Ambas variables se incorporan en un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, considerando un balance de energía-masa. El modelo desarrollado considera varios mecanismos de transferencia de calor, en los cuales se incluyen las ganancias de calor debido a la radiación solar absorbida a través de las superficies traslúcidas, la evapotranspiración de los cultivos, la conducción, convección y radiación a través de paredes y techos, además, las pérdidas debidas a las infiltraciones y el efecto del viento. Los resultados del modelo se comparan y evalúan en términos de los coeficientes de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). El R^2 y el RMSE calculados fueron $R^2 = 0.96$, $R^2 = 0.94$, $RMSE = 0.98$ °C y $RMSE=1.08$ °C, respectivamente, para la temperatura durante dos semanas consecutivas; y $R^2 = 0.83$, $R^2 = 0.81$, $RMSE = 5.45$ %HR, y $RMSE = 5.48$ %HR, respectivamente, para la humedad relativa durante el mismo período. Gracias a los sistemas pasivos utilizados para controlar las condiciones internas, la cámara de crecimiento proporciona diferencias promedio entre el interior y el exterior de $+0.34$ ° C para la temperatura y $+15.7$ %HR para la humedad sin ningún sistema de control climático (calefacción, ventilación o refrigeración). En la práctica, la CC propuesta en este documento produce en promedio 3.5 kg de forraje verde hidropónico húmedo (FVH) por cada kilogramo de semilla (maíz o cebada) cosechada sin usar fertilizantes o aditivos en el riego.

Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 13 |
| 2. Materiales y métodos | 16 |
| 2.1. Cámara de crecimiento | 16 |
| 2.2. Sensores y datos ambientales | 24 |
| 3. Modelo matemático | 27 |
| 3.1. Modelo de la temperatura interna del aire | 28 |
| 3.2. Modelo de la humedad relativa interna del aire | 33 |
| 4. Resultados de simulación y validación experimental | 35 |
| 4.1. Resultados de un día de otoño y un día de invierno. | 36 |
| 4.2. Resultados para dos semanas consecutivas. | 39 |
| 4.3. Resultados bajo diferentes escenarios. | 43 |
| 4.4. Validación experimental. | 45 |
| 5. Conclusiones | 51 |
| 5.1. Discusión | 51 |
| 5.2. Conclusiones | 54 |
| 5.3 Trabajo a futuro | 56 |
| 6. Entregables | 57 |
| 6.1 Artículo publicado en revista indizada | 57 |
| 7. Referencias | 77 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2-1. Cámara de crecimiento. (a) Fotografía de la cámara instalada y en operación en la ciudad de Querétaro, capital del estado del mismo nombre. (b) Dibujo esquemático..... | 17 |
| Figura 2-2. Elementos instalados en la cámara de crecimiento. (a) Paneles solares, calentados solar y extractor eólico. (b) Control de riego. | 18 |
| Figura 2-3. Bandejas con semillas en la parte semioscura de la cámara de crecimiento. | 20 |
| Figura 2-4. Sistema de recirculación de la cámara. (a) Piso de geomembrana. (b) Tubería de recirculación. | 21 |
| Figura 2-5. Sistema de riego. (a) Depósito de agua. (b) Bomba sumergible. (c) Tubería de riego con aspersores. | 22 |
| Figura 2-6. Ejemplo de aplicación del filtrado a dos variables externas medidas. (a) Radiación solar el día 11 de noviembre con y sin filtro. (b) Velocidad el viento el día 11 de noviembre con y sin filtrado. (c) Radiación solar el día 2 de febrero con filtro y sin él. (d) Velocidad del viento el día 2 de febrero filtrado y sin filtrar. | 26 |
| Figura 3-1. Esquema de interacciones entre las variables internar y externas de la cámara de crecimiento. | 27 |
| Figura 3-2. Esquema de una red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared sujeta a convección y radiación sobre ambos lados..... | 31 |
| Figura 4-1. Resultados de la simulación de temperatura durante dos días en diferentes estaciones. (a) Temperatura en otoño. (b) Análisis de regresión de la temperatura en otoño, $R^2=0.94$. (c) Temperatura en invierno. (d) Análisis de regresión en invierno, $R^2=0.99$ | 37 |
| Figura 4-2. Resultados de la simulación de humedad relativa durante dos días en diferentes estaciones. (a) Humedad relativa en otoño. (b) Análisis de regresión de la humedad relativa en otoño, $R^2=0.97$. (c) Humedad relativa en invierno. (d) Análisis de regresión de la humedad relativa en invierno, $R^2=0.87$ | 38 |
| Figura 4-3. Resultados de la simulación de temperatura para dos semanas, del 3 al 9 de Julio y del 10 al 16 de Julio. (a) Temperatura simulada en la primera semana. (b) Análisis de regresión para la temperatura en la primera semana, $R^2=0.92$. (c) Temperatura simulada en la segunda semana. (d) Análisis de regresión para la temperatura en la segunda semana, $R^2=0.92$ | 40 |
| Figura 4-4. Resultados de la simulación de la humedad relativa para dos semanas, del 3 al 9 de Julio y del 10 al 16 de Julio del año 2016. (a) Humedad relativa simulada para la primera semana. (b) Análisis de regresión para humedad en la primera semana, $R^2=0.83$. (c) Humedad relativa simulada para la segunda semana. (d) Análisis de regresión para la humedad en la segunda semana, $R^2= 0.81$ | 41 |

Figura 4-5. Comportamiento del modelo en múltiples escenarios. (a) Primer escenario, donde la cámara está vacía. (b) Segundo escenario, donde solo es considerado la ventilación natural. (c, d) Tercer y cuarto escenario, cuando todas las variables en la simulación son incluidas. 44

Figura 4-6. Comparativa entre los cultivos temporales de forraje verde usando Zea mays y Hordeum vulgare in la cámara de crecimiento. (a) FVH de maíz en su tercer día. (b) FVH de cebada en su tercer día. (c) FVH de maíz en décimo día. (d) FVH de cebada en su décimo día. (e) FVH de maíz en su decimoquinto día. (e) FVH de cebada en su decimosegundo día. 47

Figura 4-7. Producción de forraje al interior de la cámara. (a) Forraje de maíz. (b) Forraje de cebada. 48

Figura 4-8. Cámaras de crecimiento instaladas en lugares donde no llega la red eléctrica convencional en el estado de Querétaro. (a) CC funcionando en la comunidad de Agua fría. (b) CC funcionando en la comunidad de Coyote. 50

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2-1. Incertidumbre de los instrumentos de medición. | 25 |
| Tabla 3-1. Parámetros usados para el modelo matemático propuesto para simular las condiciones internas de la cámara de crecimiento. | 34 |
| Tabla 4-1. Análisis comparativo de los resultados obtenidos a través del modelo de humedad propuesto y los obtenidos por medio de un modelo de humedad que incluye (i) un método diferente de cálculo de evapotranspiración reproducido con permiso de [37], y (ii) una ecuación para la condensación [45]. | 42 |
| Tabla 4-2. Valores de R^2 calculados usando una regresión lineal y una polinómica de quinto grado. | 43 |
| Tabla 4-3. Comparación de valores medidos y simulados bajo diferentes escenarios. | 45 |
| Tabla 4-4. Resultados de la producción de forraje verde hidropónico de <i>Zea mays</i> en un ciclo de 15 días. | 49 |
| Tabla 4-5. Resultados de la producción de forraje verde hidropónico de <i>Hordeum vulgare</i> en un ciclo de 12 días. | 49 |

1. Introducción

El desarrollo de modelos matemáticos y su posterior simulación se utilizan para predecir el comportamiento de ciertas variables en un sistema determinado que cambia con el tiempo. En nuestro caso, dicho sistema es la cámara de crecimiento (CC) presentada en la **Figura 2-1**. Debido a las complejas interacciones que se llevan a cabo entre las variables, tales como temperatura, humedad, radiación, dióxido de carbono, agua, nutrientes, plagas, enfermedades y enfermedades, malezas, entre otras, es necesario identificarlas y analizarlas en subsistemas. Varios autores [1–20] han caracterizado los subsistemas desde diferentes perspectivas, por ejemplo, clima, nutrición e irrigación. Los modelos se utilizan para lograr un conocimiento detallado de todas las interacciones y procesos. En algunas investigaciones, a través del modelado y la simulación, se analizan los efectos de las técnicas de control ambiental para mantener las siguientes variables críticas: temperatura, humedad, iluminación y concentración de dióxido de carbono [1,2].

Otros proyectos de investigación predicen el comportamiento de una o más variables y proporcionan una respuesta adecuada para mantener estas variables dentro de los límites deseados [3–5]. La mayor parte de la investigación sobre modelos y simulaciones se ha desarrollado principalmente para invernaderos [6–11] para predecir las condiciones ambientales internas de los recintos utilizados para el cultivo y el crecimiento de las plantas. También se han llevado a cabo varios estudios desde la perspectiva de diferentes entornos de modelos, con el objetivo de conocer el comportamiento de las variables internas, como la temperatura y la humedad relativa, que servirán de apoyo para luego definir una estrategia adecuada para controlar las condiciones de crecimiento, dentro de un recinto cerrado. Aunque el tipo de cultivo no se define explícitamente, su influencia es implícita, dada su condición inherente en los modelos. Estos estudios han implementado diferentes

enfoques para desarrollar estos modelos, como redes neuronales, algoritmos genéticos y modelos neuro-difusos [12-16], donde el objeto de estudio se centra en la ventilación natural, ventilación forzada, evaporadores de enfriamiento o sistemas que se integran calefacción [17-20], por mencionar algunos de ellos. Por otro lado, existen estudios alternativos no desarrollados para ambientes de invernadero, y propuestos por algunos autores para modelar y simular la temperatura y la humedad [21-25].

En nuestra propuesta, principios físicos se utilizan para obtener un modelo matemático de la CC. Debido a esto, su entorno interno se describe empleando ecuaciones diferenciales [26]. Esta metodología permite a los investigadores obtener un modelo medio-ambiental de la CC, que relaciona variables externas (temperatura del aire, humedad relativa, radiación global y velocidad del viento), variables internas (por ejemplo, evapotranspiración) y las propiedades ópticas y térmicas de los materiales de construcción, junto con el volumen y la superficie del recinto. En nuestra investigación, la resolución de ecuaciones y la implementación de las simulaciones se llevaron a cabo con el software Matlab® (R2010A, MathWorks, Natick, MA, EE. UU.).

Por otro lado, el forraje verde hidropónico (FVH) es una técnica de producción de forraje (biomasa vegetal), a partir de la germinación de granos forrajeros en un estado de crecimiento durante un corto período de tiempo dentro de una cámara de cultivo especial. El grano germinado alcanza una altura promedio de 25 centímetros. El animal consume el tallo, las hojas verdes, la raíz y los granos no germinados. Según los trabajos de Ata [27] y otros autores [28,29], el forraje tiene efectos positivos, alta digestibilidad y calidad nutricional que sirve para compensar las necesidades de alimentación del animal. Al combinar la CC con el cultivo

hidropónico, se puede garantizar el crecimiento del forraje en lugares y épocas del año, independientemente de las condiciones climáticas.

En este estudio, los autores proponen una novedosa CC que integra el concepto de energía renovable aprovechando los recursos naturales para su funcionamiento porque utiliza un panel solar montado en el techo. Debido a su diseño, la CC utiliza un sistema pasivo para controlar la temperatura y la humedad. La CC no contiene sistemas artificiales de calefacción, refrigeración o iluminación, y podría ser relevante para la producción de forraje verde hidropónico. Se ha desarrollado un modelo matemático para estimar la temperatura del aire interior y la humedad relativa de la CC. La confianza en la precisión y la fiabilidad del modelo se establece comparando los valores simulados y los valores medidos a través del coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). Los resultados de la comparación revelan un buen acuerdo entre los datos de medición experimentales y los obtenidos por el modelo matemático. Es necesario aclarar que no es el objetivo principal de la investigación actual desarrollar un modelo complejo con un alto nivel de detalle y precisión, sino un modelo simple que proporcione predicciones satisfactorias para respuestas ambientales realistas de la temperatura y humedad del aire dentro de la CC. La aplicación de los resultados de la simulación de este estudio pueden considerarse como una referencia para optimizar el modelo de predicción de temperatura y humedad en otras cámaras de crecimiento en estudio.

2. Materiales y métodos

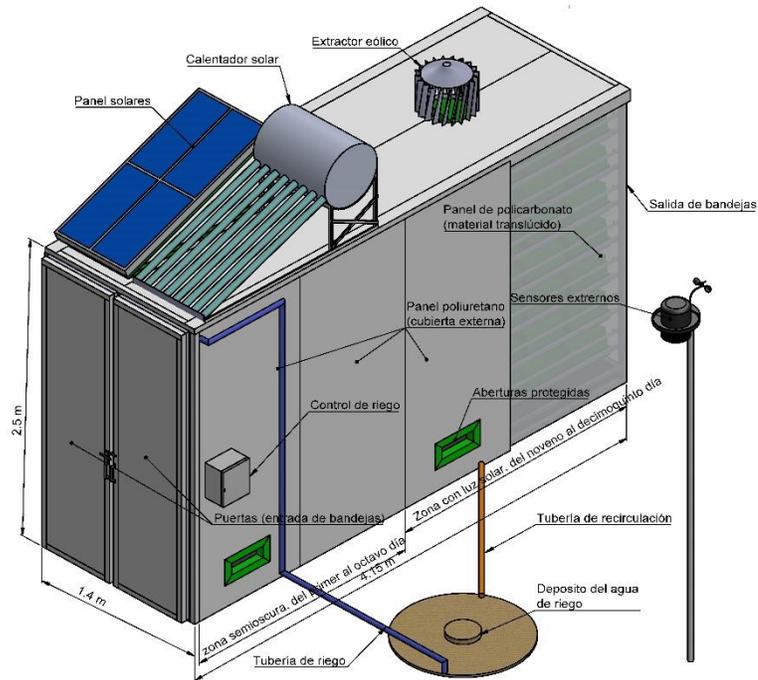
2.1. Cámara de crecimiento

El énfasis de este trabajo es la predicción y medición de la temperatura interna del aire y la humedad relativa en una cámara de crecimiento (CC) para la producción de forraje verde hidropónico (FVH) construida para instalarse en una granja al aire libre como se observa en la **Figura 2-1a**, en la ciudad de Querétaro, capital del estado del mismo nombre, México. Como se mencionó anteriormente, en la CC se brindan las condiciones que se requieren para el crecimiento y desarrollo de cultivos temporales (CT) de FVH. Vale la pena mencionar que el término de cultivo utilizado en nuestro trabajo se emplea de acuerdo, con la definición de la FAO (disponible en <http://www.fao.org/es/faodef/fdef11e.htm>), es decir, forraje utilizado principalmente como parte de la dieta animal, y eso puede volverse temporal. La **Figura 2-1b** presenta el esquema de la cámara propuesta. Algunas generalidades que describen y ayudan a comprender un poco el concepto es el siguiente: debido a su diseño, el CC utiliza sistemas pasivos para controlar la temperatura, la humedad y la velocidad del viento basándose en el filtrado de las condiciones exteriores sin operar ningún sistema de control climático ya sea para calentamiento, enfriamiento o evaporativo.

La cámara de crecimiento integra el concepto de energía renovable porque cuenta con tecnología que aprovecha los recursos naturales para su funcionamiento, como se puede ver en la **Figura 2-2**. Además, está construido con una estructura metálica anticorrosiva con un perfil rectangular tubular en acero inoxidable de 40×40 mm, calibre 12, lo que le brinda rigidez.



(a)



(b)

Figura 2-1. Cámara de crecimiento. (a) Fotografía de la cámara instalada y en operación en la ciudad de Querétaro, capital del estado del mismo nombre. (b) Dibujo esquemático.



(a)



(b)

Figura 2-2. Elementos instalados en la cámara de crecimiento. (a) Paneles solares, calentados solar y extractor eólico. (b) Control de riego.

Además, está cubierto con un panel tipo sándwich de caras metálicas de acero galvanizado y un núcleo aislante rígido de poliuretano PUR de alta densidad ($40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) con un espesor de 40 mm, modelo PF600-40L de la compañía PAINEL2000, que es útil para aislar el interior de las condiciones extremas presentes en el medio exterior. En el techo de la cámara se instala un colector solar, el cuál es un panel solar policristalino de la marca EPCOM de 125 W modelo EPL12512 y un extractor de viento de la marca ATCFANS modelo BK2000-14 de aluminio anodizado.

El sistema fotovoltaico asegura la implementación y operación del CC en cualquier lugar, sin depender de la electricidad convencional. Este sistema fotovoltaico está integrado por los siguientes tres elementos: (1) un controlador de carga solar con modulación de ancho de pulso (PMW), fabricado por PHOCOS modelo CX40; (2) un inversor RALLY de 1200 W modelo 7466 para convertir 12 VCC a 120 VCA; y (3) dos baterías solares de ciclo profundo de estera de vidrio absorbente (AGM), marca CONER modelo 31H, 12 V y 115 Ah. El extractor solo gira debido al viento externo presente en el sitio de instalación de la CC (el movimiento del extractor de viento se ignora debido a la diferencia de temperatura). Por lo tanto, se dice que la ventilación es natural.

La parte inferior de cada pared de la cámara (derecha e izquierda) tiene dos aberturas, con una malla de acero inoxidable 40, marca SORFORD, que evita la entrada de plagas u objetos ya que la CC está al aire libre. Debido al extractor de viento, el aire ingresa a través de estas aberturas y fluye hacia arriba. Una geomembrana de alta densidad (HDPE) de 1 mm de espesor fabricada por GSE cubre el piso de madera.

El interior de la CC se divide en dos zonas: la primera parte ofrece condiciones de semioscuridad, las cuales deben mantenerse así durante los primeros ocho días, cuando la semilla comienza a germinar; y una segunda parte, donde los brotes de forraje son expuestos a luz solar para completar su desarrollo desde el noveno día hasta el decimoquinto día. La iluminación es natural gracias a los rayos solares que atraviesan el panel de policarbonato celular (perfil U de SKYFLEX de 6 mm). En el interior de la CC, hay 12 rieles utilizados para desplazar las bandejas horizontalmente, distribuidas en dos secciones, con seis rieles por sección, y los rieles están separados verticalmente 31 cm, ver **Figura 2-3**.



Figura 2-3. Bandejas con semillas en la parte semioscura de la cámara de crecimiento.

El cultivo del FVH se realiza en bandejas de 60×40 cm y 7.5 cm de altura, fabricadas por HYDROCULTURA. Cada bandeja tiene un ángulo de inclinación de 35.5° con agujeros en la parte inferior, lo que permite que el agua fluya y drene; a diferencia de los sistemas de producción convencionales que utilizan la práctica de riego “correr y desperdiciar”, es decir, el agua en el piso no se reutiliza y por lo tanto se desperdicia. Además como se muestra en la **Figura 2-4**, existe un sistema para la recirculación de agua, que permite un ahorro considerable de la misma. Esta es una de las ventajas del sistema de producción propuesto.



(a)



(b)

Figura 2-4. Sistema de recirculación de la cámara. (a) Piso de geomembrana. (b) Tubería de recirculación.

Además, la CC tiene un sistema de riego con los siguientes dos componentes: (1) un tanque de almacenamiento de 1000 L, y (2) una bomba de agua sumergible de la marca ORANGEPUMPS de 250 W modelo CSP250C-4, como se ilustra en la **Figura 2-5.**



(a)



(b)



(c)

Figura 2-5. Sistema de riego. (a) Depósito de agua. (b) Bomba sumergible. (c) Tubería de riego con aspersores.

La distribución del agua se realiza con tubos de PVC de 13 mm de diámetro, con perforaciones cada 64 cm, donde hay rociadores instalados fabricados por EVERGREEN modelo MS 8009. Cabe aclarar que el riego se realiza con agua pura, es decir, no se agregan nutrientes ni fertilizantes.

La CC se define de la siguiente manera: la CC es un prototipo destinado a mitigar o prevenir las pérdidas de producción de los pequeños y medianos ganaderos o productores de animales pequeños. Tiene las siguientes características: es una cámara pequeña, la gente no puede entrar en ella, y sólo una parte de ella contiene material translúcido. Gracias a su forma y tamaño, la cámara se puede reubicar sin desarmarla en su totalidad, y para su instalación y puesta en marcha se requiere de poco tiempo. La CC hace un uso eficiente del espacio debido a la estructura compuesta por varias capas en una dirección vertical. Debido al óptimo aislamiento de la cámara, presenta un consumo de energía eficiente.

Por otro lado, uno pensaría que una CC es como un invernadero; sin embargo, hay varias diferencias. Por ejemplo, un invernadero es un lugar cerrado, estático y accesible a pie, y la luz atraviesa el vidrio translúcido o el plástico, permitiendo aprovechar el efecto de la radiación solar. Esta estructura cubre el cultivo y tiene al menos un dispositivo que puede ser manipulado para controlar las variables del entorno, nutricionales o bióticas o ambas, que influyen en el crecimiento y desarrollo del cultivo. Otra diferencia marcada entre un invernadero y el CC es en el aspecto comercial porque un invernadero busca una producción a gran escala que genere valor económico, mientras que una CC se utiliza para asegurar la producción de alimentos para animales.

2.2. Sensores y datos ambientales

La CC cuenta con un sensor registrador de datos certificado y calibrado de fabrica marca EXTECH modelo RHT10. La ubicación del sensor es de 2.08 m detrás de las puertas, 1.25 m por encima del suelo, y 0.7 m delante de las paredes. Este dispositivo es útil para registrar y almacenar la temperatura y la humedad relativa cada día. La resolución y la precisión del sensor de temperatura son de 0.1°C y $\pm 1,0$ C, respectivamente. La resolución del sensor de humedad relativa es de $0.1\%RH$. La precisión cambia de acuerdo al rango de medición; para el rango de 60 a $80\%RH$, es de $\pm 3.5\%RH$, y para 80 a $100\%RH$, es de $\pm 5.0\%RH$. Las condiciones climáticas externas se obtienen de una estación meteorológica Davis Vantage Pro2, modelo 6162. Esta estación ha sido utilizada en varios estudios científicos reportados en la literatura actual [30,31], lo que demuestra su practicidad así como la posibilidad de medir diferentes variables con un solo dispositivo. La estación está situada fuera de la CC, a 4 m a la izquierda de la pared y a 3 m del suelo, y permite capturar los siguientes datos: Temperatura, humedad relativa, solar radiación y velocidad del viento. En este estudio, los datos recopilados el 11 de noviembre de 2015 y el 2 de febrero de 2016 se utilizaron para llevar a cabo la caracterización del modelo con fines de simulación. Estos datos se seleccionaron porque, en comparación con la información obtenida en los otros días, presentaban alteraciones importantes. La temperatura y la humedad se adquirieron cada 5 minutos (intervalo de medición), obteniendo un total de 288 mediciones por variable en un día. Otros datos recopilados durante dos semanas consecutivas, del 3 de julio de 2016 al 16 de julio de 2016 (se seleccionaron 15 días porque este período corresponde a un ciclo de producción de FVH), se utilizaron para validar el modelo, es decir, 4320 mediciones en 15 días por variable. Este intervalo de medición para la recopilación de datos se estableció con base en el trabajo reportado en [2,8].

Tabla 2-1. Incertidumbre de los instrumentos de medición.

| Parámetros | Instrumento | Incertidumbre |
|---|----------------------|--|
| Temperatura interna(T_{in}) | USB datalogger RHT10 | ± 1.0 °C ± 5.0 % (0 a 20 y 80 a 100%) |
| Humedad relativa interna(HR_{in}) | USB datalogger RHT10 | ± 3.5 % (20 a 40 y 60 a 80%) ± 3.0 % (40 a 60%) |
| Temperatura externa (T_{ext}) | Davis Vantage | ± 0.5 °C |
| Humedad relativa externa (HR_{ext}) | Davis Vantage | ± 5 % |
| Velocidad del viento (ϕ_{wind}) | Davis Vantage | ± 3.0 % |
| Radiación solar | Davis Vantage | ± 5.0 % |

También vale la pena mencionar que los datos registrados se filtraron para evitar picos no deseados durante el proceso de simulación. El filtro utilizado se llama mediana-promediador, y es útil en el análisis estadístico. Este filtro calcula primero el filtro promediador, seguido del operador mediana. Formalmente, esto se expresa por:

$$\xi_{\mu B}(f)(x) = XM_{\mu B}(\bar{X}_{\mu B}(f))(x) \quad (1)$$

Donde, $\xi_{\mu B}$ representa el filtro mediana-promediador de tamaño μ ; $XM_{\mu B}$ denota el filtro mediana de tamaño μ ; $\bar{X}_{\mu B}$ denota el filtro promediador de tamaño μ ; f representa el vector de entrada; x punto de evaluación; B simboliza el elemento estructurante elemental; and μ es un criterio de tamaño, por ejemplo, Si $\mu = 1$, el número de elemento es $2\mu + 1 = 3$, y si $\mu = 2$, el número de elemento es $2\mu + 1 = 5$, etc. El filtro expresado en la Ecuación 1 fue implementado en Matlab® R2010A

La **Figura 2-6** nos muestra un ejemplo del filtro mediana-promediador aplicado a los datos de radiación y velocidad del viento, para un día de la temporada de otoño y otro día en la temporada de invierno.

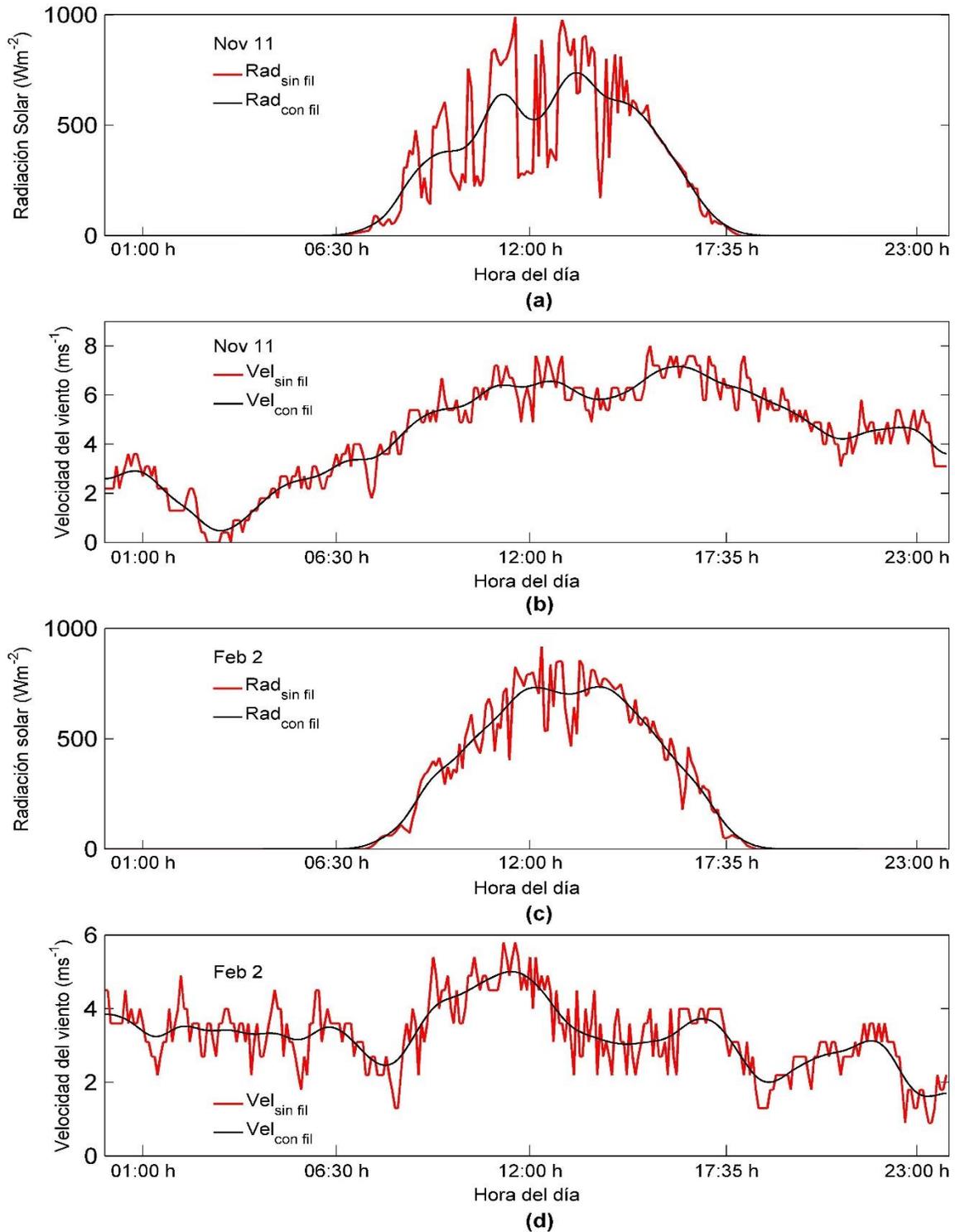


Figura 2-6. Ejemplo de aplicación del filtrado a dos variables externas medidas. (a) Radiación solar el día 11 de noviembre con y sin filtro. (b) Velocidad el viento el día 11 de noviembre con y sin filtrado. (c) Radiación solar el día 2 de febrero con filtro y sin él. (d) Velocidad del viento el día 2 de febrero filtrado y sin filtrar.

3. Modelo matemático

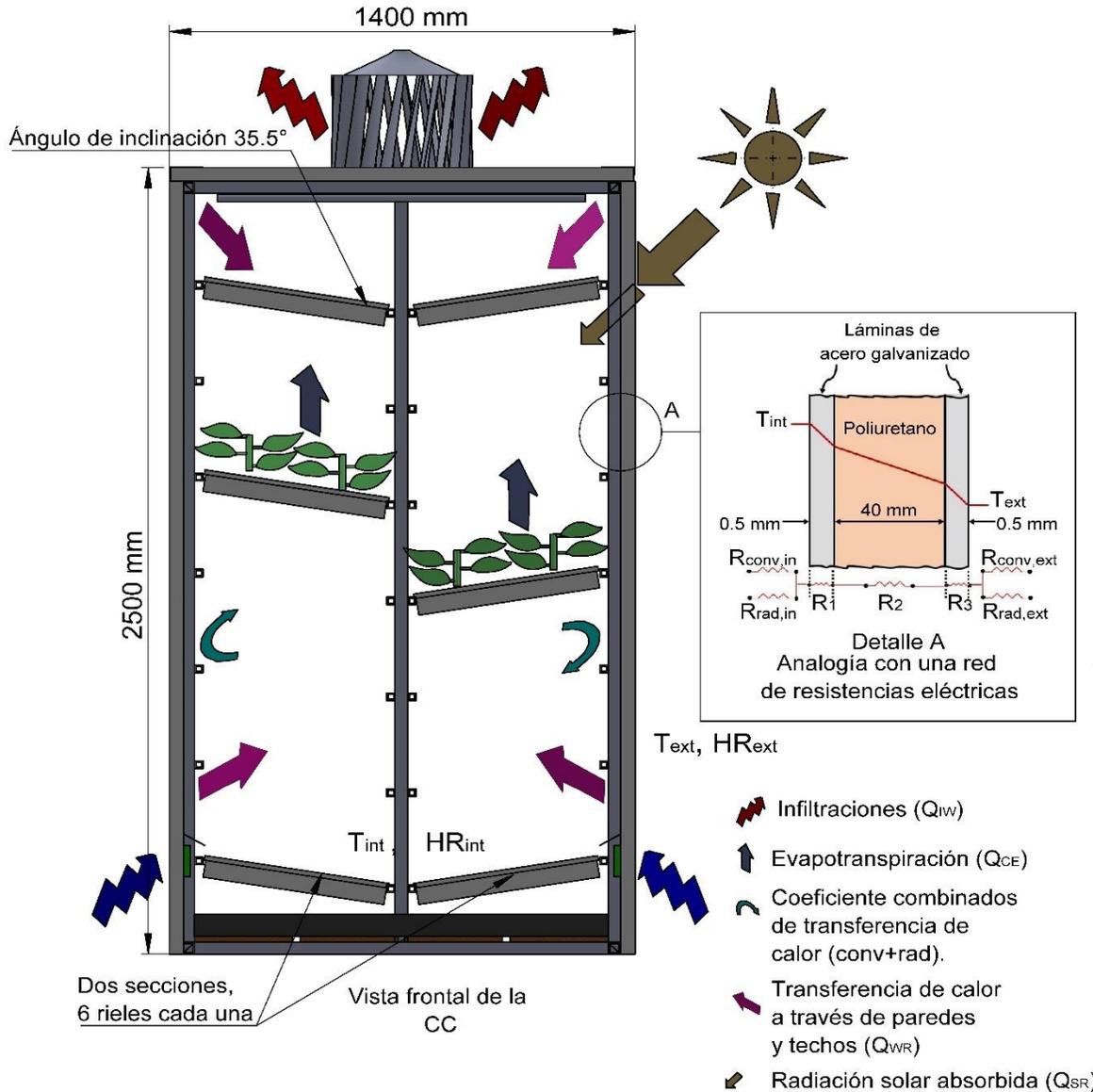


Figura 3-1. Esquema de interacciones entre las variables interna y externas de la cámara de crecimiento.

El entorno interno de la CC puede describirse utilizando un sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden, que caracterizan el comportamiento de la temperatura del aire y la humedad relativa [21,32,33] siguiendo los equilibrios de masa y energía considerando las interacciones ilustradas en **Figura 3-1**. Las condiciones climáticas externas influyen en este modelo, así como la ubicación,

orientación y tamaño de la CC. El modelo ambiental simplificado descrito en esta sección toma en consideración los siguientes supuestos:

1. En el modelo de temperatura del aire, las fuentes de ganancias de calor son el calor absorbido a través de las superficies translúcidas, la evapotranspiración del CT y la transferencia de calor a través de las paredes y el techo, mientras que la principal fuente de pérdida de calor es la ventilación. La condensación de las paredes (como resultado del calor latente) no se considera como parámetro ni la nebulización ni la evaporación del agua en la superficie del suelo.
2. El modelo de humedad en el aire considera la evapotranspiración del cultivo y la ventilación como la principal causa de ganancia y pérdida de humedad, respectivamente.
3. La variable de evapotranspiración del cultivo utilizada en el modelo ambiental proviene de algunas relaciones propuestas por otros autores. Tales variables satisfacen para ser una función lineal de la radiación global.
4. Las relaciones matemáticas de los procesos físicos, como la ventilación, se simplifican. La velocidad del viento dentro de la CC se considera homogénea, sin considerar las múltiples capas de cultivo en la CC. La temperatura de ventilación natural es despreciada, debido al pequeño efecto de la misma, con respecto a la producida por el viento. Las relaciones empíricas se utilizan para modelar este fenómeno físico.
5. Los modelos de temperatura y humedad internas consideran una distribución homogénea uniforme de variables al interior de la CC.

3.1. Modelo de la temperatura interna del aire

La **Figura 3-1**, ilustra las ganancias calor debido a la radiación solar absorbida a través de las superficies translúcidas (Q_{SR}), el calor proporcionado por la

evapotranspiración del cultivo (Q_{CE}) y la transferencia de calor a través de las paredes y el techo (Q_{WR}), mientras que las pérdidas de calor se deben a infiltraciones y el efecto del viento (Q_{IW}). La ecuación propuesta para modelar el comportamiento de la temperatura interna es la siguiente:

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_a H} [Q_{SR} + Q_{CE} + Q_{WR} - Q_{IW}] \quad (2)$$

Donde C_p es el calor específico a presión constante ($J \cdot kg_{aire\ seco}^{-1} \cdot K^{-1}$); ρ_a es la densidad del aire ($kg_{aire\ seco} \cdot m^{-3}$); H representa la altura promedio del CC (m).

El calor absorbido por la superficie translúcida de la CC debido a la radiación solar se estima utilizando la siguiente ecuación [34,35]:

$$Q_{SR} = C_1 Q_{GR} \quad (3)$$

Donde Q_{GR} es la radiación global externa ($W \cdot m^{-2}$); y C_1 es un coeficiente adimensional que se relaciona con la transmitancia de energía a través del material translúcido y es una propiedad de los materiales que se emplearon en la construcción.

Según la literatura, existen varios modelos matemáticos de evapotranspiración para cultivos [36–38], algunos de los cuales son más complejos que otros. Sin embargo, el factor que ha demostrado la mayor correlación con la evapotranspiración es la radiación. Según el trabajo realizado por Jolliet [39], suponemos que la evapotranspiración de los cultivos es una función lineal de la radiación solar. Por esta razón, la Ecuación (4) expresa el término que asocia el calor aportado por la evapotranspiración (Q_{CE}) [34]:

$$Q_{CE} = E = 0.00006 C_1 Q_{GR} + 0.0004 \quad (4)$$

La ganancia de calor a través de las paredes y el techo hacia el interior de la CC (Q_{WR}) considera: (1) la conducción a través de la pared y el techo, y (2) la convección y la radiación asociadas con sus superficies. La Ecuación (5) se define como [40]:

$$Q_{WR} = \frac{(T_{int} - T_{ext})}{R_{total}} \quad (5)$$

Donde $T_{int} - T_{ext}$ define la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la CC, R_{total} es la resistencia térmica total en $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$. El factor Q_{WR} puede manejarse utilizando el concepto de resistencia térmica. La **Figura 3-2** (Detalle A) ilustra un esquema de la red de resistencia térmica.

Las Ecuaciones (6)-(11) representan el concepto del parámetro de resistencia térmica. Este concepto es empleado, por ejemplo, por Sarafranz et al. [41], para estimar el coeficiente global de transferencia de calor ($1/R$). Las ecuaciones definidas en [40] se presentan como sigue:

$$R_{conv,in} = \frac{1}{h_{conv,int}} \quad (6)$$

$$R_{rad,in} = \frac{1}{h_{rad,in}} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{cov,int}^2 + T_{int}^2) \cdot (T_{cov,int} + T_{int})} \quad (7)$$

$$R_1 = R_3 = 1.80 \text{ m}^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1} \quad (8)$$

$$R_2 = R_{pul} = \frac{b}{K_{mat}} \quad (9)$$

$$R_{conv,ext} = \frac{1}{h_{conv,ext}} \quad (10)$$

$$R_{conv,ext} = \frac{1}{h_{rad,ext}} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{cov,ext}^2 + T_{int}^2) \cdot (T_{cov,ext} + T_{int})} \quad (11)$$

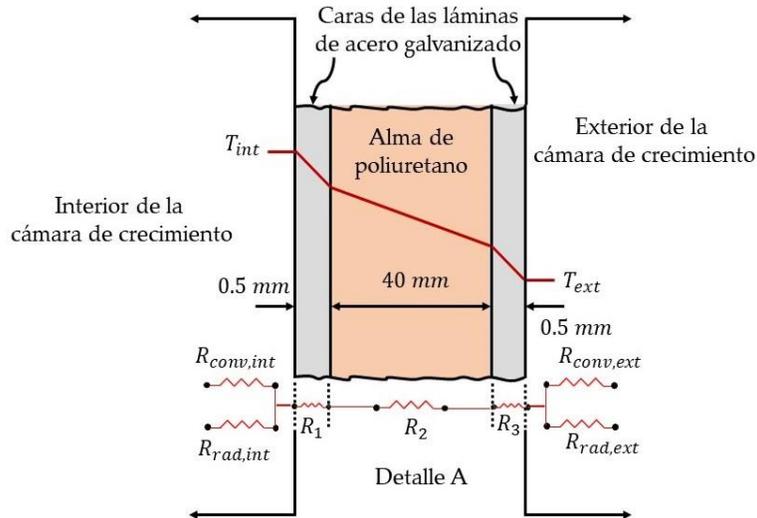


Figura 3-2. Esquema de una red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared sujeta a convección y radiación sobre ambos lados.

Donde h_{conv} y h_{rad} son los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación en las superficies; ε es el coeficiente de emisividad; σ corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann; $T_{cub,int}$ y $T_{cub,ext}$ son las temperaturas de las cubiertas en las superficies internas y externas, respectivamente; R_1 representa la resistencia térmica para las láminas interior y exterior de las caras metálicas de acero galvanizado con un espesor de 0,5 mm, respectivamente; b es el grosor del núcleo aislante; k_{mat} es la conductividad térmica declarada con un valor de $0.0211 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. Los valores están en la hoja de datos técnicos de los materiales.

Dado que las resistencias de convección y radiación son paralelas entre sí, esto puede causar algunas complicaciones en la red de resistencia térmica. Al reemplazar h_{conv} en las ecuaciones (6) y (10) por $h_{conv,rad,int}$ y $h_{conv,rad,ext}$ que incluyen los efectos de la radiación en las láminas interior y exterior de las superficies metálicas de acero galvanizado de paredes y techos (llamados conductancia superficial, que representa los coeficientes combinados de transferencia de calor por convección y radiación), evita todas las complicaciones

asociadas con el efecto de la radiación. Los valores comunes para $h_{\text{conv,rad,int}}$ y $h_{\text{conv,rad,ext}}$ considerando una carga máxima, se calculan de la siguiente manera [42]:

$$h_{\text{conv,rad,int}} = 8.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \text{ (verano ó invierno)} \quad (12)$$

$$h_{\text{conv,rad,ext}} = \begin{cases} 34.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \text{ (invierno)} \\ 22.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \text{ (verano)} \end{cases} \quad (13)$$

Según la consideración realizada para el efecto de radiación, la configuración de resistencia es en serie, por lo tanto, la resistencia térmica total se obtiene a continuación:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{conv,rad,in}} + R_1 + R_{\text{Pul}} + R_3 + R_{\text{conv,rad,out}} \quad (14)$$

El flujo de energía causado por las infiltraciones y el efecto de la ventilación se calcula a continuación [35]:

$$Q_{IW} = \frac{V_{\text{vien}} \cdot \rho_a \cdot C_p}{A_{LC}} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad (15)$$

Donde V_{vien} representa el flujo de aire a través de las aberturas de la CC ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); y A_{LC} es el área longitudinal de la cámara (m^2), que es el resultado de multiplicar el ancho por la altura de la CC.

Posteriormente, al reemplazar las Ecuaciones (3), (4), (5) y (15) en la Ecuación (2), el modelo matemático para predecir la temperatura interna del aire de la CC quedaría como:

$$\frac{dT_{\text{int}}}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot \rho_a \cdot H} \{ (C_1 \cdot Q_{GR}) + (0.00006 \cdot C_1 \cdot Q_{GR} + 0.0004) + \frac{(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})}{R_{\text{total}}} - \frac{V_{\text{vien}} \cdot C_p \cdot \rho_a}{A_{LC}} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \} \quad (16)$$

3.2. Modelo de la humedad relativa interna del aire

Para la humedad relativa, la fuente de vapor de agua fue la evapotranspiración del CT (E), y la única pérdida de agua del sistema se debió a la ventilación. Entonces, la ecuación (17) representa los cambios en el vapor de agua producidos al interior de la CC, es decir:

$$\frac{d\omega_{int}}{dt} = \frac{1}{H\rho_a} \left[E - \frac{V_{vien}}{A_{LC}} \rho_a (\omega_{int} - \omega_{ext}) \right] \quad (17)$$

La Ecuación (4) establece la evapotranspiración del cultivo E ($\text{kg}_{\text{vap agua}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); $\omega_{int} - \omega_{ext}$ representa la diferencia entre la humedad absoluta interior y exterior de la CC, y se calcula utilizando las siguientes ecuaciones [43]:

$$\omega_{int} = \frac{HR_{int\ sim}}{100} [(0.004055) + (0.0001152 \cdot T_{int\ sim}) + (0.00002167 \cdot T_{int\ sim}^2)] \quad (18)$$

$$\omega_{ext} = \frac{HR_{ext\ med}}{100} [(0.004055) + (0.0001152 \cdot T_{ext}) + (0.00002167 \cdot T_{ext}^2)] \quad (19)$$

Donde $HR_{int\ sim}$ es el valor simulado de la humedad relativa interna de la cámara; y $T_{int\ sim}$ es el de la temperatura interna simulada a través de la ecuación (16).

Se supuso que las condiciones iniciales (tiempo $t = 0$) para cada una de las variables de estado de las ecuaciones diferenciales (16) y (17) son iguales a la temperatura exterior medida (T_{ext}) y la humedad (ω_{ext}). Por ejemplo, al registrar datos de medición a la hora 00:00, con el sensor de temperatura exterior leyendo 15 °C, entonces $T_{int} = T_{ext} = 15$ °C; de manera similar, se hace para $\omega_{int} = \omega_{ext}$. Otros valores iniciales de entrada utilizados en estas ecuaciones fueron las variables medidas externas, como la radiación global y la velocidad del viento. La **Tabla 3-1** presenta los parámetros utilizados en el modelo.

Tabla 3-1. Parámetros usados para el modelo matemático propuesto para simular las condiciones internas de la cámara de crecimiento.

| Parámetros | Significado | Valor (Unidad) |
|----------------------------|---|--|
| A_{LC} | Área longitudinal | 4.6 (m ²) |
| c_p | Calor específico a presión constante | 1010 (J · kg _{dry air} ⁻¹ · K ⁻¹) |
| $\frac{d\omega_{int}}{dt}$ | Diferencial de humedad absoluta | (kg _{water} · kg _{dry air} ⁻¹ · s ⁻¹) |
| $\frac{dT_{int}}{dt}$ | Diferencial de temperatura | (K · s ⁻¹) |
| E | Evapotranspiración del cultivo | (kg _{water} · m ⁻² · s ⁻¹) |
| ϕ | Humedad relativa | (%) |
| V_{vien} | Flujo de aire a través de las aperturas | (m ³ · s ⁻¹) |
| HR _{int} , HRI | Humedad relativa interna | (%) |
| HR _{ext} | Humedad relativa externa | (%) |
| ω_{int} | Humedad absoluta interna | (kg _{wat vap} · kg _{dry air} ⁻¹) |
| ω_{ext} | Humedad absoluta externa | (kg _{wat vap} · kg _{dry air} ⁻¹) |
| T_{int} , TI | Temperatura interna | (°C, K) |
| T_{ext} | Temperatura externa | (°C, K) |
| C_1 | Coficiente que relaciona la energía de transmitancia del material plástico. | 0.32 (dimensionless) |

4. Resultados de simulación y validación experimental

En esta sección se explicarán los resultados obtenidos de la simulación a través del modelo matemático propuesto; y la validación experimental de la cámara de crecimiento como ejemplo de su funcionalidad en el área de producción de forraje verde hidropónico.

Para evaluar el rendimiento del modelo matemático, utilizamos dos criterios: (1) El coeficiente de determinación (R^2) obtenido a través de un análisis de regresión (para la humedad, se utiliza una función polinomial de quinto grado, debido al comportamiento no lineal); y (2) el error cuadrático medio (RMSE). Estos criterios evaluaron la correlación entre los valores simulados y medidos. Se definen de la siguiente manera:

$$\text{RMSE } T \text{ (}^\circ\text{C)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (T_{in\ sim} - T_{in\ med})^2} \quad (20)$$

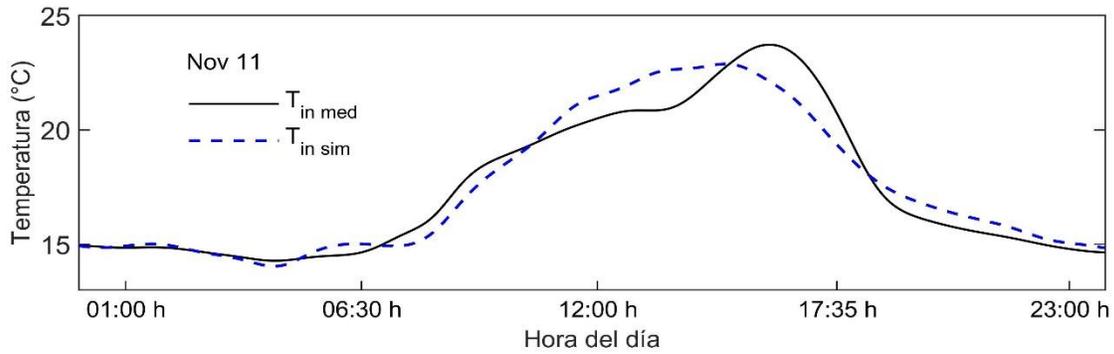
$$\text{RMSE } HR \text{ (\%)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (HR_{in\ sim} - HR_{in\ med})^2} \quad (21)$$

Donde $T_{in\ sim}$ y $HR_{in\ sim}$ corresponden a los valores simulados de la temperatura y la humedad relativa dentro de la CC, respectivamente; $T_{in\ med}$ y $HR_{in\ med}$ representan el valores medidos de la temperatura y la humedad relativa al interior de la CC, respectivamente.

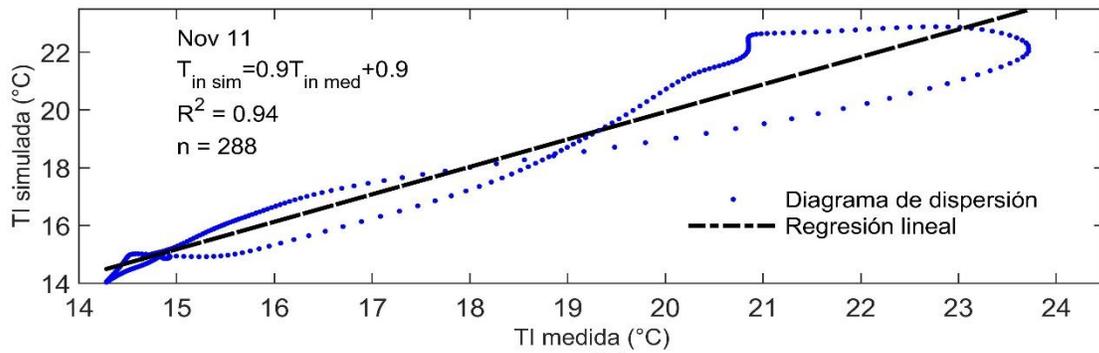
4.1. Resultados de un día de otoño y un día de invierno.

Los resultados de la simulación correspondientes a la temperatura y la humedad relativa de dos días, el 11 de noviembre de 2015 y el 2 de febrero de 2016, se pueden ver en la **Figura 4-1** y **Figura 4-2**, respectivamente. Para cada día se tienen en cuenta 288 muestras de temperatura y humedad relativa, se consideran en total 1152 muestras. A partir de los datos graficados en la figuras mencionadas anteriormente, se calcula la diferencia promedio entre el valor simulado y el valor medido, dando un resultado de $\overline{T_{in\ sim} - T_{in\ med}} = 0.06 \text{ } ^\circ \text{C}$ para la temperatura y $\overline{HR_{in\ sim} - HR_{in\ med}} = -6.1\% \text{ HR}$ para la humedad relativa en un día en otoño, y $\overline{T_{in\ sim} - T_{in\ med}} = 1.2 \text{ } ^\circ \text{C}$ y $\overline{HR_{in\ sim} - HR_{in\ med}} = -7.9\% \text{ HR}$ para un día de invierno. Los signos negativos revelan una subestimación del modelo matemático, es decir, el valor simulado fue menor que el valor medido.

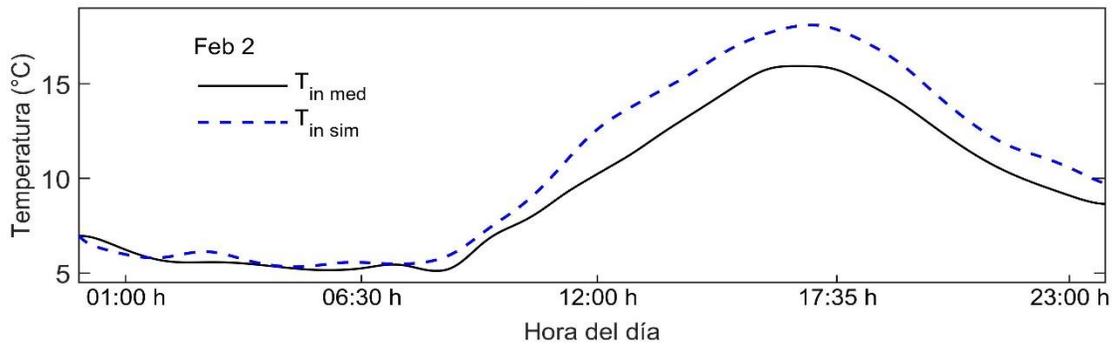
La **Figura 4-1b** y **4-1d** y la **Figura 4-2b** y **4-2d** muestran los gráficos correspondientes al análisis de regresión para los dos días considerados en la simulación. Los coeficientes de determinación deducidos de los datos son los siguientes: (1) $R^2 = 0.94$ para la temperatura en un día de otoño y $R^2 = 0.99$ para la temperatura en un día de invierno, y (2) $R^2 = 0.97$ para la humedad relativa en un día de otoño y $R^2 = 0.87$ para la humedad relativa en un día de invierno. Comparando los coeficientes obtenidos en esta investigación con respecto a los reportados en [44], cuyos valores son $R^2 = 0.92$ y $R^2 = 0.87$ para la temperatura y la humedad relativa en un invernadero, se observó una pequeña mejora con respecto a la temperatura, y no hubo diferencias con respecto a la humedad relativa.



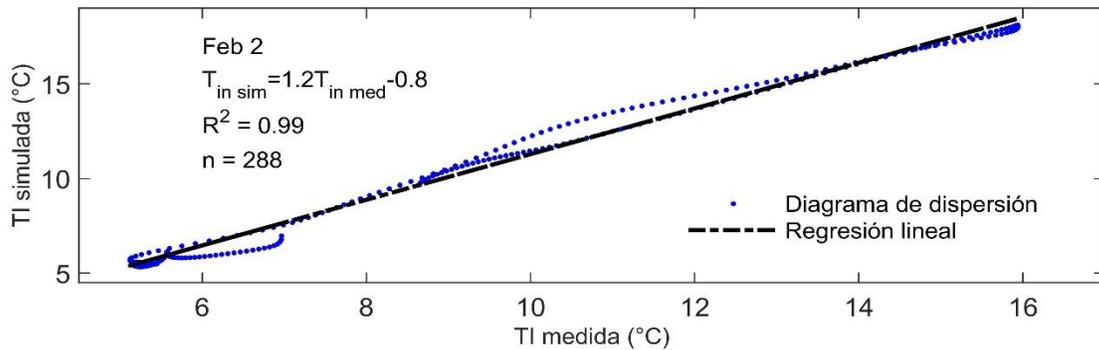
(a)



(b)

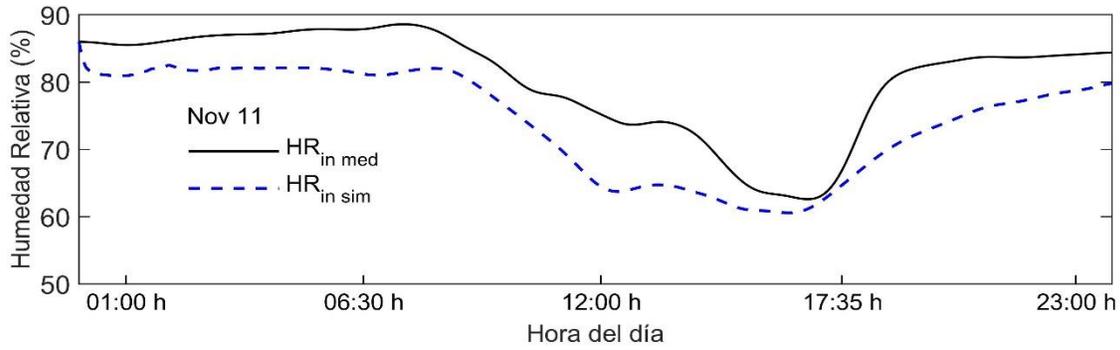


(c)

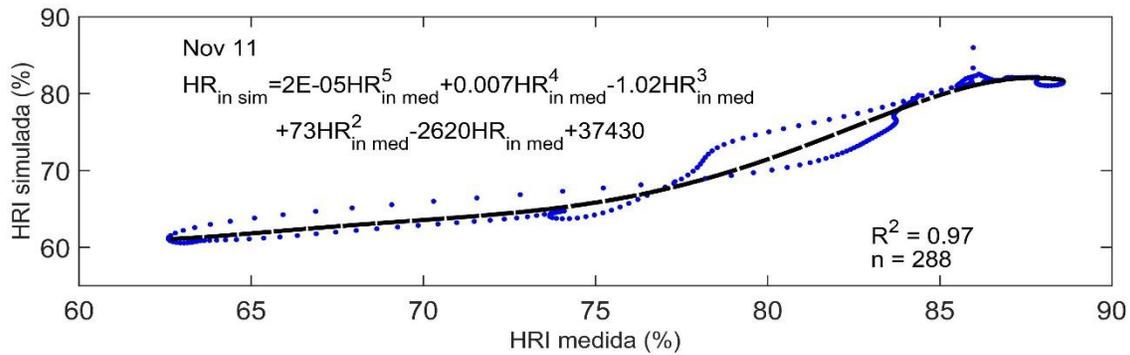


(d)

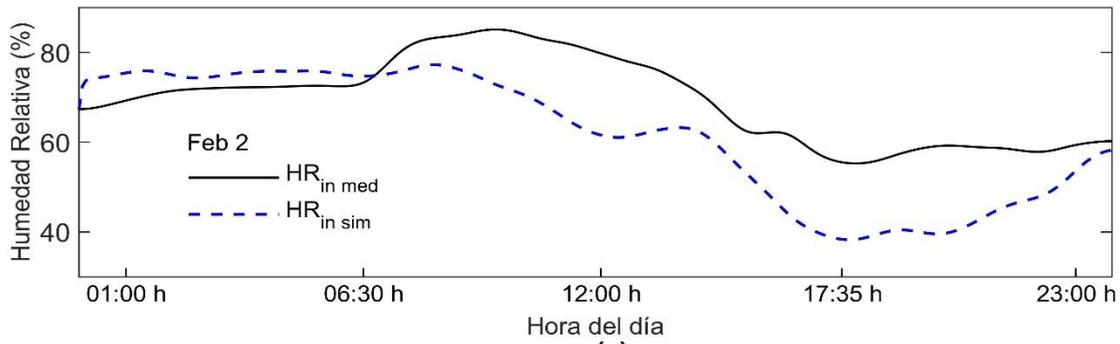
Figura 4-1. Resultados de la simulación de temperatura durante dos días en diferentes estaciones. (a) Temperatura en otoño. (b) Análisis de regresión de la temperatura en otoño, $R^2=0.94$. (c) Temperatura en invierno. (d) Análisis de regresión en invierno, $R^2=0.99$.



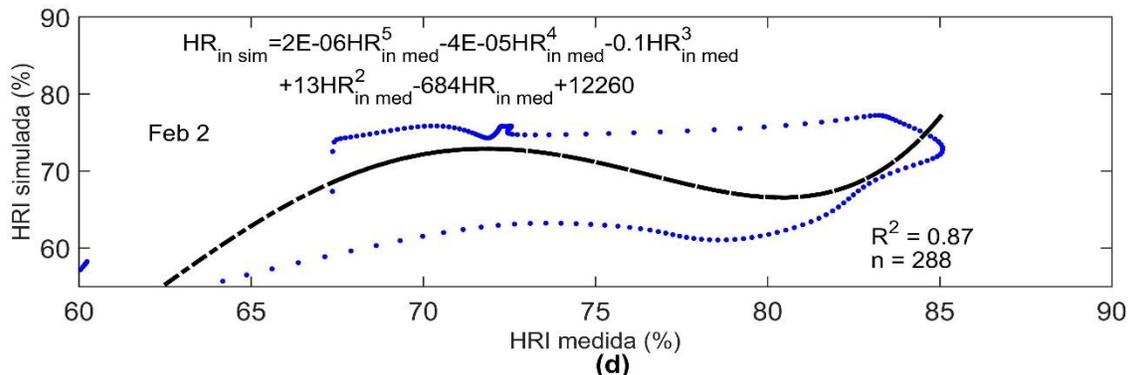
(a)



(b)



(c)

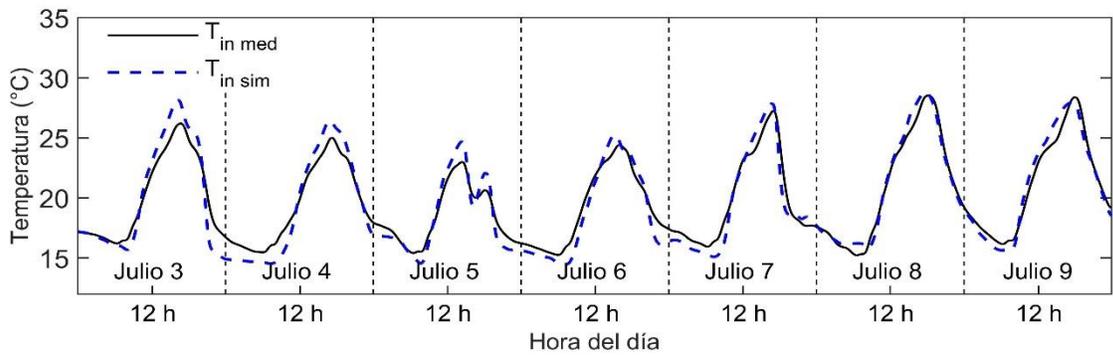


(d)

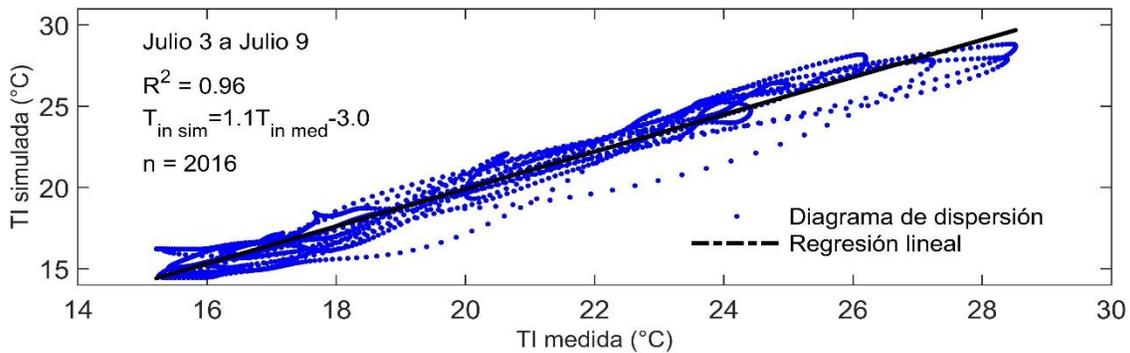
Figura 4-2. Resultados de la simulación de humedad relativa durante dos días en diferentes estaciones. (a) Humedad relativa en otoño. (b) Análisis de regresión de la humedad relativa en otoño, $R^2=0.97$. (c) Humedad relativa en invierno. (d) Análisis de regresión de la humedad relativa en invierno, $R^2=0.87$.

4.2. Resultados para dos semanas consecutivas.

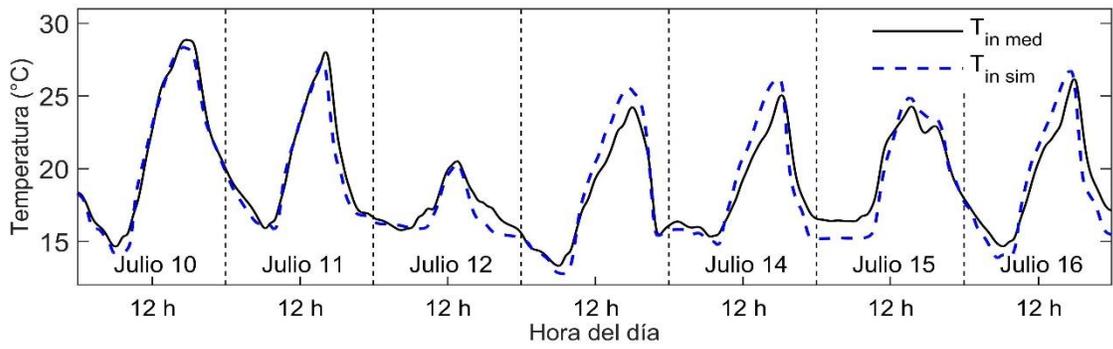
En esta sección se proporcionan simulaciones similares a las presentadas en la **Figuras 4-1 y 4-2**, pero ahora se consideran 15 días. En la **Figuras 4-3 y 4-4** y, se muestran los gráficos correspondientes para la temperatura ($n = 2016$) y la humedad relativa ($n = 2016$) para las dos semanas (del 3 de julio al 16 de julio del año 2016). En la **Figuras 4-3 y 4-4**, las líneas horizontales indican los días. La **Figura 4-3a y 4-3c** muestra una confrontación visual de la temperatura interna medida y la temperatura interna simulada (o predicha) de la semana del 3 al 9 de julio (primera semana) y la semana del 10 al 16 de julio (segunda semana), respectivamente. Las **Figuras 4-3b y 4-3d** muestran el análisis de regresión de la temperatura interna, con las líneas de regresión que mejor se ajustan al diagrama de dispersión y las ecuaciones de regresión lineal con sus valores de coeficiente de determinación. De manera similar, la **Figura 4-4a y 4-4c** muestra una verificación visual de la humedad relativa interna medida y la humedad relativa interna simulada (o predicha) de la primera y la segunda semana, respectivamente. La **Figura 4-4b y 4-4d** muestra el análisis de regresión de humedad relativa interna utilizando una aproximación polinómica (para obtener un mejor ajuste de los datos), con las líneas de regresión que mejor se ajustan al diagrama de dispersión y las ecuaciones de regresión con sus respectivos valores de coeficiente de determinación. Los valores RMSE para la primera semana son 0.98°C y 5.5% HR, mientras que los de la segunda semana son 1.08°C y 5.5% HR. De la misma manera, el valor RMSE de la temperatura simulada es menor que el valor informado en [15], de 1.9°C , y un poco más alto que el valor RMSE de la humedad relativa informada en el mismo papel, con un valor de 3.2% HR por tres días consecutivos en un invernadero.



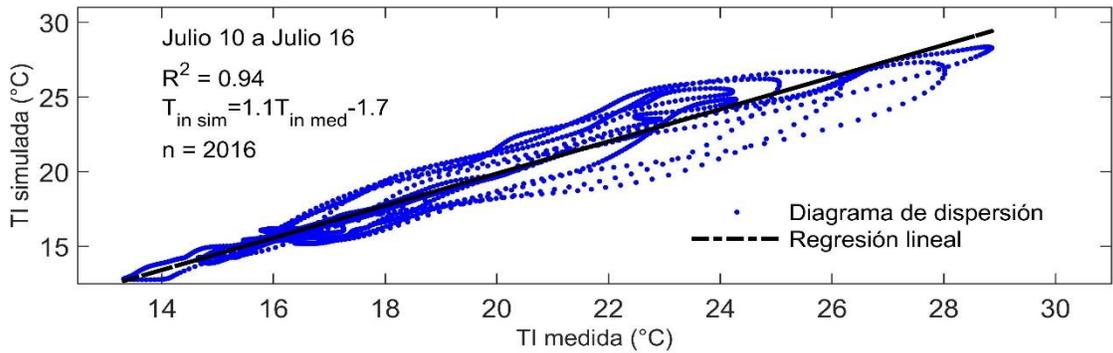
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4-3. Resultados de la simulación de temperatura para dos semanas, del 3 al 9 de Julio y del 10 al 16 de Julio. (a) Temperatura simulada en la primera semana. (b) Análisis de regresión para la temperatura en la primera semana, $R^2=0.92$. (c) Temperatura simulada en la segunda semana. (d) Análisis de regresión para la temperatura en la segunda semana, $R^2=0.92$.

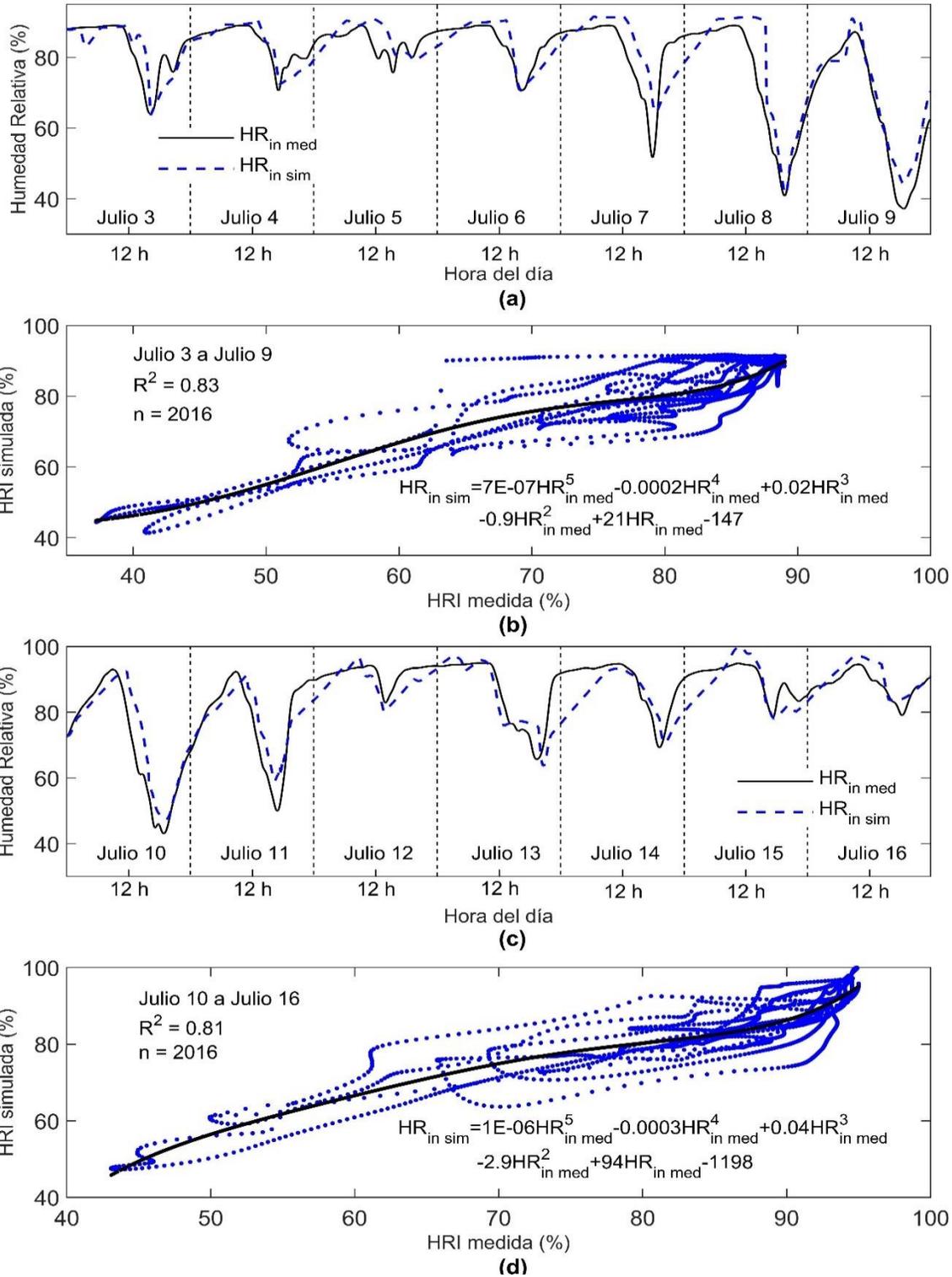


Figura 4-4. Resultados de la simulación de la humedad relativa para dos semanas, del 3 al 9 de Julio y del 10 al 16 de Julio del año 2016. (a) Humedad relativa simulada para la primera semana. (b) Análisis de regresión para humedad en la primera semana, $R^2=0.83$. (c) Humedad relativa simulada para la segunda semana. (d) Análisis de regresión para la humedad en la segunda semana, $R^2=0.81$.

El valor RMSE calculado obtenido en nuestra investigación es ligeramente mayor que el reportado en [26], de 0.9 ° C, y más bajo en comparación con la humedad relativa de 6.6% HR para un solo día de simulación dentro de un invernadero.

La **Tabla 4-1** presenta el coeficiente de determinación y los errores cuadrados medios asociados con las simulaciones obtenidas a través del modelo de humedad propuesto, y los obtenidos de un modelo de humedad que incluye (i) un método diferente para obtener la evapotranspiración [37], y (ii) una ecuación para la condensación [45].

En varios estudios [6,44], el análisis de regresión aplicado al modelo tiene una correspondencia lineal, pero en nuestro caso, debido a las fluctuaciones presentadas por los datos, se calcula una aproximación polinómica ya que el comportamiento no se corresponde con una recta línea. La **Tabla 4-2** muestra los valores de R² calculados mediante regresión lineal y un polinomio de quinto grado.

Tabla 4-1. Análisis comparativo de los resultados obtenidos a través del modelo de humedad propuesto y los obtenidos por medio de un modelo de humedad que incluye (i) un método diferente de cálculo de evapotranspiración reproducido con permiso de [37], y (ii) una ecuación para la condensación [45].

| Parámetro | Noviembre 11 | Febrero 2 | Julio 3 a 9 | Julio 10 a 16 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Número de datos (n) | 288 | 288 | 2016 | 2016 |
| R ² para T | 0.94 | 0.99 | 0.96 | 0.94 |
| R ² para RH | 0.97 | 0.87 | 0.83 | 0.81 |
| ¹ R ² para RH | ¹ 0.90 | ¹ 0.74 | ¹ 0.84 | ¹ 0.83 |
| RMSE T (°C) | 0.78 | 1.47 | 0.98 | 1.08 |
| RMSE RH (%) | 6.53 | 11.64 | 5.45 | 5.48 |
| ¹ RMSE RH | 6.60 | 9.83 | 5.25 | 5.27 |
| $\overline{T_{in\ sim} - T_{in\ med}}$ | 0.06 | 1.17 | 0.11 | 0.19 |
| $\overline{HR_{in\ sim} - HR_{in\ med}}$ | 6.096 | 7.912 | 1.192 | 0.733 |

¹Resultados obtenidos con otro método para calcular la evapotranspiración [32] donde también se incluye la condensación [41]. Nota: los valores obtenidos de R² y RMSE está por debajo de la resolución del sensor.

Tabla 4-2. Valores de R^2 calculados usando una regresión lineal y una polinómica de quinto grado.

| Fecha | Ecuación | | R^2 | |
|----------------|--------------------|---|--------|------------|
| | Lineal | Polinómica | Lineal | Polinómica |
| Noviembre 11 | $0.9562x - 2.5738$ | $-2E - 05x^5 + 0.007x^4 - 1.02x^3 + 73.2x^2 - 2620x + 37,430$ | 0.91 | 0.97 |
| Febrero 2 | $1.1936x - 21.365$ | $2E - 06x^5 - 4E - 05x^4 - 0.09x^3 + 13.4x^2 - 685x - 12,260$ | 0.64 | 0.87 |
| Julio 3 al 9 | $0.8193x + 15.551$ | $7E - 07x^5 - 0.0002x^4 + 0.02x^3 + 0.9x^2 - 22x - 147.64$ | 0.81 | 0.83 |
| Julio 10 al 16 | $0.7804x + 17.872$ | $1E - 06x^5 - 0.0003x^4 - 0.44x^3 - 2.9x^2 + 95x - 1197.7$ | 0.79 | 0.81 |

4.3. Resultados bajo diferentes escenarios.

A continuación se presentan cuatro escenarios, considerando las variables Q_{SR} , Q_{WR} , Q_{IW} y Q_{CE} . Se agregan gradualmente hasta que se completen todos.

En el primer escenario, la acción de la temperatura no considera la ventilación, el riego o el forraje dentro de la CC, es decir, solo interviene el calor que fluye a través de las paredes, techos y superficies translúcidas. La **Figura 4-5a** presenta el resultado, y la Ecuación (2) se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_a H} \left\{ C_1 Q_{GR} + \frac{(T_{int} - T_{ext})}{R_{total}} \right\}, \quad (21)$$

En el segundo escenario, se considera la ventilación natural sin aplicar riego y forraje. Aquí, interviene la variable que se relaciona con las pérdidas debidas a infiltraciones de ventilación. En la **Figura 4-5b** se presenta el resultado, y entonces la Ecuación (2) se expresa como:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_a H} \left\{ C_1 Q_{GR} + \frac{(T_{int} - T_{ext})}{R_{total}} - \frac{V_{vien} \cdot C_p \cdot \rho_a}{A_{LC}} (T_{int} - T_{ext}) \right\}, \quad (22)$$

En el primer y segundo escenario, se analiza una CC vacío, por lo que el calor proporcionado por la evapotranspiración del cultivo no interviene.

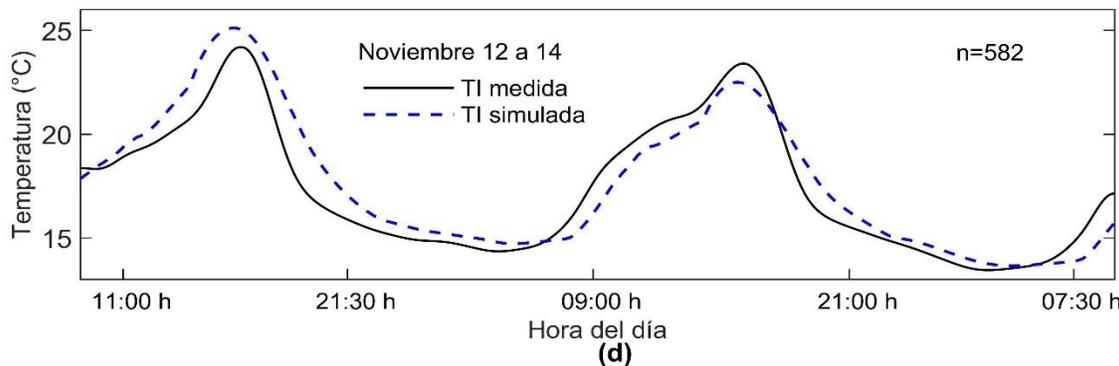
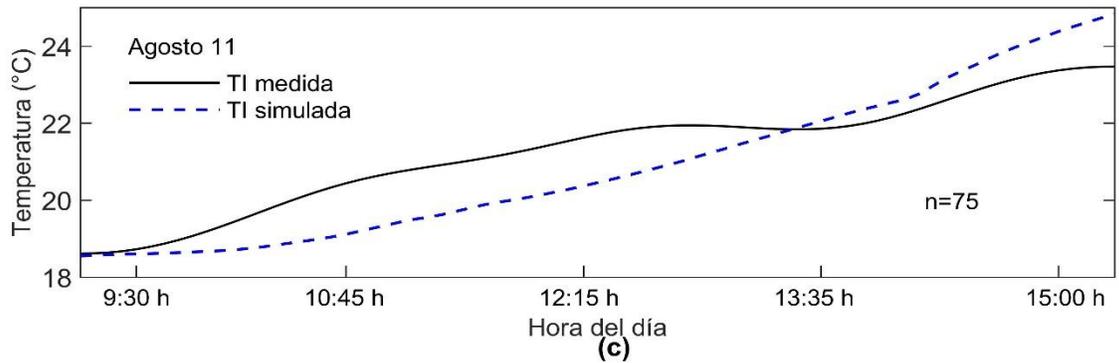
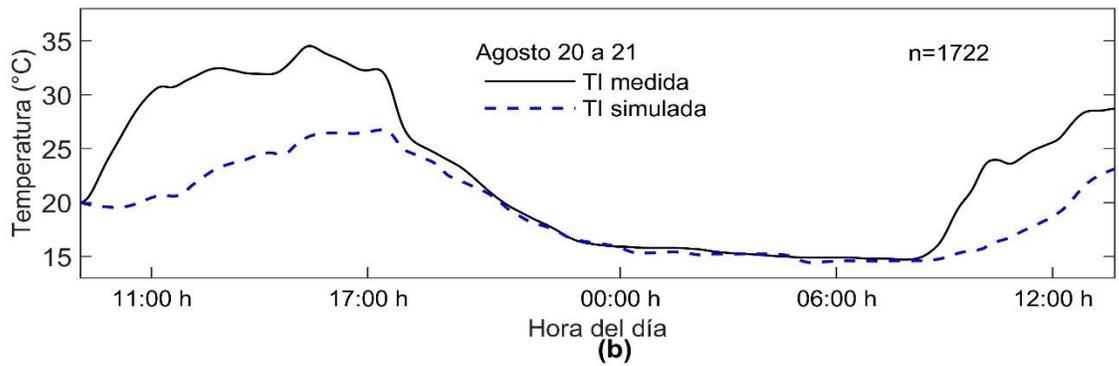
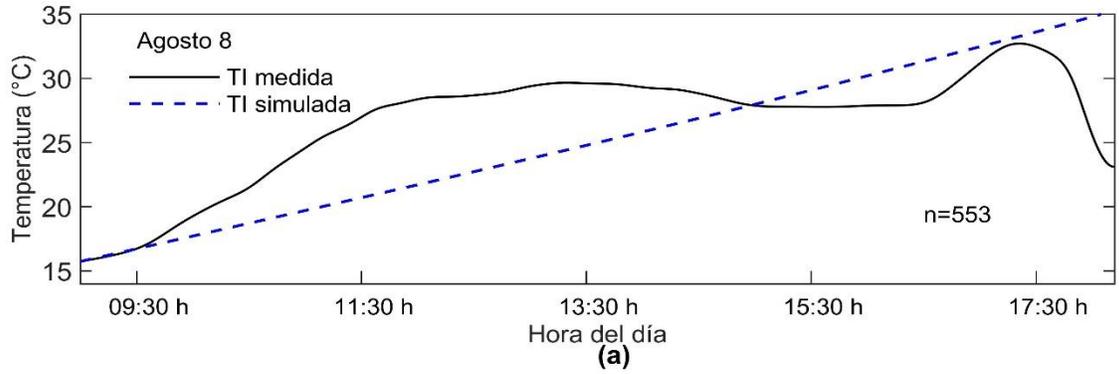


Figura 4-5. Comportamiento del modelo en múltiples escenarios. (a) Primer escenario, donde la cámara está vacía. (b) Segundo escenario, donde solo es considerado la ventilación natural. (c, d) Tercer y cuarto escenario, cuando todas las variables en la simulación son incluidas.

Tercer y cuarto escenario: incluyen todas las variables y la contribución de la evapotranspiración del cultivo. Los resultados se muestran en las **Figura 4-5c** y **4-5d**, respectivamente. Observe que se producen mejores simulaciones al aumentar el número de variables y esto indica que se necesitan al menos cuatro entradas para el desarrollo de un modelo general. La **Tabla 4-3** muestra los coeficientes de determinación y las variables que intervienen en cada uno de los escenarios.

Tabla 4-3. Comparación de valores medidos y simulados bajo diferentes escenarios.

| Escenarios | R ² | RMSE | Variables | Número de datos | Fecha |
|------------|----------------|------|---|-------------------------|------------------------|
| 1 | 0.53 | 4.15 | Q _{SR} and Q _{WR} | 553, cada minuto | 8 Agosto 2015 |
| 2 | 0.82 | 5.04 | Q _{SR} , Q _{WR} , and Q _{TW} | 1722, cada minuto | 20 a 21 Agosto 2015 |
| 3 | 0.86 | 0.92 | Q _{SR} , Q _{WR} , Q _{TW} , and Q _{CE} | 75, cada cinco minutos | 11 Agosto 2015 |
| 4 | 0.91 | 1.04 | Q _{SR} , Q _{WR} , Q _{TW} , and Q _{CE} | 582, cada cinco minutos | 12 a 14 Noviembre 2015 |

4.4. Validación experimental.

Las variables que más influyen en el desarrollo del CT de FVH son la temperatura y la humedad. En la literatura, se han realizado varios estudios en diferentes condiciones de temperatura controlada y humedad relativa, dependiendo de la aplicación, por ejemplo, 21–25 ° C y 65–75% HR [46]; 22–26 ° C y 50–73% HR [47]; 23–25 ° C y 6-70% HR [48]; 18–21 ° C y 70% HR [49]. En tales estudios se informan rendimientos de 7 a 12 kg de FVH húmedo por kilogramo de semilla cosechada. La temperatura y la humedad deben mantenerse lo más estables posible dentro de un rango específico para obtener una buena cosecha dentro del CC. Si establecemos el rango ideal para las condiciones internas (temperatura y humedad), en base a los autores citados anteriormente, que está entre 20 ° C y 25 ° C para temperatura y 70% y 80% para humedad relativa, encontramos que solo 31% de los datos de temperatura medidos dentro de la cámara permanecen en ese rango ideal de temperatura interna, aunque la temperatura interna promedio medida es de 20 °

C. En el caso de la humedad relativa, solo el 14% de los datos de humedad medidos dentro de la cámara están en el rango de humedad ideal, mientras que el promedio de la humedad relativa interna medida es del 82%.

Los ejemplos de CT proporcionados en esta subsección sirven únicamente para ilustrar la funcionalidad de la CC propuesta. Este documento solo informa los resultados obtenidos en el campo de la producción de forraje utilizando el CC. Nuestro enfoque es el modelado y la simulación de la temperatura interna del aire y la humedad relativa interna. De esta manera, cualquier análisis económico, práctico o nutricional está fuera del alcance del documento. Las CT corresponden a *Zea mays* y *Hordeum vulgare* en ciclos de producción de 15 días y 12 días, respectivamente. El agua total utilizada dentro de la cámara se ha definido generalmente en agronomía [48] como el agua añadida durante el riego menos el agua que se drena de las bandejas. La cantidad de agua utilizada para producir un promedio diario de forraje es igual a los kilogramos de forraje húmedo producido en promedio diariamente por la CC entre el agua total utilizada dentro de la cámara. Debido al uso del agua del sistema de recirculación, el CC puede producir FVH mientras ahorra agua. En promedio, produce 1,4 kg de FVH de maíz y 1,7 kg de FVH de cebada utilizando un litro de agua por día en ciclos de 15 y 12 días, respectivamente. Las **Figuras 4-6** y **4-7** nos muestran una comparativa de la producción de FVH de *Zea mays* y *Hordeum vulgare*. Además, se registró la masa de la semilla al momento de la cosecha (semilla húmeda después de estar sumergida en agua durante 48 horas). Durante el procedimiento de siembra, la semilla se pesó en seco y se registró. Otra medida considerada fue la masa de forraje húmedo al momento de la recolección.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4-6. Comparativa entre los cultivos temporales de forraje verde usando *Zea mays* y *Hordeum vulgare* in la cámara de crecimiento. (a) FVH de maíz en su tercer día. (b) FVH de cebada en su tercer día. (c) FVH de maíz en décimo día. (d) FVH de cebada en su décimo día. (e) FVH de maíz en su decimoquinto día. (f) FVH de cebada en su decimosegundo día.



(a)



(b)

Figura 4-7. Producción de forraje al interior de la cámara. (a) Forraje de maíz. (b) Forraje de cebada.

La **Tabla 4-4** proporciona información sobre los kilogramos de forraje húmedo obtenidos para un CT de maíz en un ciclo de 15 días. Igualmente, en la **Tabla 4-5**, se presentan los resultados para un CT de cebada en un ciclo de 12 días. El factor de conversión relaciona la semilla seca con el forraje fresco de la misma muestra producida en la CC, y difiere de la relación de conversión (CR), que considera la concentración de materia seca.

Por lo general, las unidades de producción del sector agrícola se encuentran en áreas remotas sin acceso a la red eléctrica convencional, debido a esto, uno de los impactos más significativos de las tecnologías renovables es cuando se vinculan a los procesos de producción dentro del sector agrícola.

Tabla 4-4. Resultados de la producción de forraje verde hidropónico de Zea mays en un ciclo de 15 días.

| Siembra | Semilla seca sembrada | Cosecha | Forraje húmedo recolectado | Factor de conversión |
|---------|-----------------------|----------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 12 kg | 28.99 kg | 43.10 kg | 3.6 |
| 2 | 12 kg | 29.00 kg | 32.30 kg | 2.7 |
| 3 | 12 kg | 29.03 kg | 38.40 kg | 3.2 |
| 4 | 12 kg | 29.02 kg | 35.30 kg | 2.9 |
| 5 | 12 kg | 29.02 kg | 37.22 kg | 3.1 |
| 6 | 12 kg | 29.05 kg | 40.81 kg | 3.4 |
| 7 | 12 kg | 28.02 kg | 39.59 kg | 3.3 |
| 8 | 7 kg | 17.30 kg | 25.55 kg | 3.6 |

Tabla 4-5. Resultados de la producción de forraje verde hidropónico de Hordeum vulgare en un ciclo de 12 días.

| Siembra | Semilla seca sembrada | Cosecha | Forraje húmedo recolectado | Factor de conversión |
|---------|-----------------------|----------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 7 kg | 8.80 kg | 24.91 kg | 3.6 |
| 2 | 7 kg | 11.16 kg | 26.74 kg | 3.8 |
| 3 | 7 kg | 10.80 kg | 27.22 kg | 3.9 |
| 4 | 7 kg | 10.68 kg | 27.48 kg | 3.9 |
| 5 | 7 kg | 10.47 kg | 29.75 kg | 4.2 |
| 6 | 7 kg | 10.82 kg | 26.30 kg | 3.8 |
| 7 | 7 kg | 11.14 kg | 24.27 kg | 3.5 |
| 8 | 7 kg | 10.57 kg | 27.68 kg | 3.9 |



(a)



(b)

Figura 4-8. Cámaras de crecimiento instaladas en lugares donde no llega la red eléctrica convencional en el estado de Querétaro. (a) CC funcionando en la comunidad de Agua fría. (b) CC funcionando en la comunidad de Coyote.

5. Conclusiones

En este capítulo se explicarán las implicaciones de este trabajo y el trabajo futuro que aún está por venir.

5.1. Discusión

Los resultados del modelo dan predicciones satisfactorias para la temperatura del aire y la humedad en el CC. La sobreestimación durante el día y la subestimación durante la noche pueden deberse a la consideración inadecuada de un coeficiente de transferencia de calor para paredes-aire o aire de cultivo. Debido al hecho de que el valor de la humedad relativa depende del flujo de aire interno a través de las aberturas del CC (V_{vien}) y la evapotranspiración dentro del CC (E), que no se mide directamente en esta investigación, solo se estiman usando ecuaciones que se desarrollaron con datos experimentales para condiciones diferentes a las utilizadas en este estudio.

Los resultados obtenidos con el modelo de humedad propuesto se compararon con otro sistema que incluye (i) un método diferente para calcular la evapotranspiración [37], y (ii) una ecuación para la condensación [45]. Esta comparación muestra que no hay diferencias significativas en los parámetros R2 obtenidos por ambos métodos. Nuestros resultados son similares cuando se aplica el modelo matemático propuesto por Hargreaves [37] donde, los autores no consideran analizar muestras en cortos períodos de tiempo; en nuestro caso, cada 5 minutos, se midió la radiación, es decir, las variaciones de temperatura ocurren en un tiempo más largo, al comienzo y al final del día, en lugar de un período de muestreo. Si bien la ecuación propuesta aquí no es general, se puede usar para calcular parámetros determinados utilizando la información capturada de la

radiación solar. Por otro lado, el modelo introducido por Hargreaves [37] emplea valores tabulados derivados de otros procedimientos experimentales.

Además, Cengel y Boles [50] han afirmado que, a diferencia de la humedad relativa que varía a medida que varía la temperatura, la humedad absoluta permanece constante en presencia de estas variaciones. Dado que la estimación se realiza utilizando humedad absoluta, los resultados pueden no reflejar las variaciones que presentaría la humedad relativa, y esto podría explicar los bajos valores del coeficiente de determinación para el modelo de humedad.

De manera similar, a partir de la nube de puntos que se muestra en los diagramas de dispersión para el modelo de humedad en las **Figuras 4-2b** y **4-2d** y **Figuras 4-4b** y **4-4d**, existe una mejor correspondencia entre los valores simulados y los valores medidos con una función no lineal. Según lo expresado en [25] y [15], la humedad relativa es un fenómeno no lineal porque las ecuaciones no lineales involucradas en su modelado gobiernan la transferencia de calor y masa. Por lo tanto, los modelos lineales como el nuestro sufren muchas de las deficiencias al no considerar los efectos no lineales.

Además, dos factores que hemos considerado para explicar la desviación restante entre los valores simulados por el modelo y las mediciones son los siguientes: (1) La complejidad de elegir los parámetros de calibración correctos que permiten que todas las variables de estado involucradas en el modelo ajustarse simultáneamente, y (2) la suposición de que la CC es un tanque mezclador perfecto, cuando de hecho, el movimiento del aire es algo limitado como resultado de las múltiples bandejas dentro del CC. Esto afecta la distribución de temperatura y humedad dentro de la cámara, ya que suponemos que el aire es como un fluido perfectamente mezclado cuando hay una distribución espacial.

Los datos simulados y los valores medidos experimentalmente tienen un buen ajuste. Sin embargo, el modelo se puede mejorar. Sin embargo, el uso de ecuaciones más complejas para modelar la humedad dentro de recintos cultivados no garantiza mejores resultados. Por ejemplo, en [6], los autores obtuvieron coeficientes de determinación más bajos que los nuestros, o la investigación reportada en [44], quienes obtuvieron coeficientes ligeramente más altos que los nuestros. Es tan complejo modelar las condiciones de humedad, que incluso hay autores que, en su trabajo, solo modelan y simulan la temperatura, o tal vez no muestran interés en esto [11,15,33,35,43].

Para el 11 de noviembre, que corresponde a la temporada de otoño, la diferencia máxima medida entre la temperatura interna del aire de la cámara (T_{int}) y la temperatura externa (T_{ext}) fue de $2.27^{\circ} C$. Sin embargo, en promedio, la temperatura del aire interno fue solo $0.01^{\circ} C$ menor que la temperatura externa. En el caso de la humedad relativa, la diferencia máxima medida entre la humedad relativa interna y la humedad relativa externa fue del 20.8%. La humedad relativa interna fue 11.5% más alta que la humedad relativa externa en promedio. El 2 de febrero, correspondiente a la temporada de invierno, la diferencia máxima medida entre la temperatura interna del aire de la cámara y la temperatura externa fue de $0.69^{\circ} C$. Sin embargo, la temperatura interna permanece $1.1^{\circ} C$ más baja que la temperatura externa en promedio. Por otro lado, la diferencia máxima entre la humedad relativa interna de la cámara y la humedad relativa externa fue de 33.2%, y la humedad interna fue 11.5% más alta que la humedad externa en promedio. En el caso de la temporada de verano, se analizaron dos semanas consecutivas del 3 de julio al 16 de julio, las diferencias máximas medidas entre el interior y el exterior de la cámara fueron de $3.82^{\circ} C$ y 38.8% para la temperatura y la humedad relativa, respectivamente. De manera similar, la temperatura interna del aire fue solo más

alta que la temperatura externa en un promedio de 0.34°C , y la humedad relativa interna se mantuvo en un promedio de 15.7% más alta que la humedad externa.

Por otro lado, los datos de R^2 calculados con valores de 0.96 y 0.94 para el modelo de temperatura y de 0.81 y 0.80 para el modelo de humedad durante dos semanas consecutivas no son necesariamente malos en comparación con otros valores de índice publicados en otros documentos. Por ejemplo, en la investigación presentada en [6], los valores de R^2 calculados para la temperatura interna del aire fueron 0,89, 0,80 y 0,80; de manera similar, se obtuvieron valores de R^2 de 0,52, 0,73 y 0,77 para la humedad simulada en varias ejecuciones. Como se puede ver, estos valores de R^2 son más bajos que los obtenidos por el modelo propuesto en este documento. Otro ejemplo se presenta en [44], que obtuvo un R^2 máximo de 0,92 para la temperatura interna y 0,87 para la humedad relativa interna. Estos resultados son ligeramente superiores a los reportados en nuestra investigación. Observe que el valor R^2 de 0.80 es bastante común entre los trabajos publicados, lo que deriva de la complejidad para predecir la humedad en recintos cerrados para cultivos.

5.2. Conclusiones

El modelo matemático simple y eficiente propuesto en este documento para predecir la temperatura interna del aire y la humedad relativa es una herramienta útil para conocer el comportamiento de estas variables dentro de la CC ya que, a partir de los resultados obtenidos, los valores pronosticados presentan una buena correlación con los valores medidos. valores y con los reportados en la literatura al comparar los parámetros R^2 y RMSE. Los resultados de la simulación de este estudio son útiles para el diseño y la optimización de los sistemas de control ambiental aplicados a una cámara de crecimiento. A continuación, se presentan algunas conclusiones de los resultados:

1. Durante dos semanas consecutivas del verano, los coeficientes de los valores de determinación fueron $R^2 = 0.96$ y $R^2 = 0.94$ para el modelo de temperatura, y $R^2 = 0.83$ y $R^2 = 0.81$ para el modelo de humedad relativa. Para un día de invierno, estos coeficientes fueron $R^2 = 0.99$ y $R^2 = 0.87$ para la temperatura del aire y la humedad relativa, respectivamente. Del mismo modo, los resultados para un día de otoño fueron $R^2 = 0.94$ y $R^2 = 0.97$.
2. Los valores RMSE para el modelo de temperatura fueron 0.98 ($^{\circ}\text{C}$) y 1.08 ($^{\circ}\text{C}$) durante dos semanas consecutivas de verano, y 5.45 (% HR) y 5.48 (%HR) para el modelo de humedad en el mismo período de medición. . Para un día de otoño, los valores RMSE calculados fueron 0.78 ($^{\circ}\text{C}$) y 6.5 (%HR) para temperatura y humedad, respectivamente. Para un día de invierno, los valores RMSE fueron 1.47 ($^{\circ}\text{C}$) y 11.6 (%HR).
3. Las diferencias de temperatura promedio entre las temperaturas del aire simuladas y medidas y la humedad relativa simulada y medida no fueron inferiores a 0.1 $^{\circ}\text{C}$ y 1.2 %HR para el período del 3 al 9 de julio, y para el período del 10 al 16 de julio, el las diferencias fueron no menos de 0.2 $^{\circ}\text{C}$ y menos de 0.7 %HR. Igualmente, las diferencias promedio fueron más de 0.06 $^{\circ}\text{C}$ (debajo de la resolución del sensor) y 6.1 %HR, correspondiente a un día de otoño, y para un día de invierno, los resultados no fueron más de 1.2 $^{\circ}\text{C}$ y menos de 7.9 %RH.
4. Con el uso de la cámara de crecimiento, se puede garantizar el crecimiento del forraje en diferentes lugares y épocas del año, independientemente de las condiciones climáticas. Aunque el interior de la cámara, en promedio, era solo un poco más frío en otoño $\overline{(T_{in} - T_{out})} = -0.01$ $^{\circ}\text{C}$, (por debajo de la resolución del sensor) e invierno $\overline{(T_{in} - T_{out})} = -1.1$ $^{\circ}\text{C}$ y solo un poco más caluroso en verano $\overline{(T_{in} - T_{out})} = +0.3$ $^{\circ}\text{C}$, esto no le impidió cumplir su objetivo de producir FVH. Vale la pena enfatizar que el interior siempre

estuvo húmedo en comparación con las condiciones externas que ocurrieron en el lugar de la experimentación, por lo tanto, los materiales seleccionados para la construcción de la CC son adecuados.

5. Los resultados obtenidos en la producción de FVH son interesantes porque, a pesar de no tener un control ambiental, no usar semillas certificadas y usar agua sin nutrientes, se logró la tasa de producción promedio de 3.5 kg de FVH húmedo por cada kilogramo de semilla (maíz o cebada) cosechada.

5.3 Trabajo a futuro

Los autores creen que aún hay un campo que se puede explotar como lo es, estudio de factibilidad económica donde se expongan las cualidades y las capacidades que tiene el forraje verde al ser producido de manera hidropónica.

6. Entregables

6.1 Artículo publicado en revista indizada



Article

Modeling and Simulation of Temperature and Relative Humidity Inside a Growth Chamber

Germán Díaz-Flórez ¹, Jorge Mendiola-Santibañez ² , Luis Solís-Sánchez ¹, Domingo Gómez-Meléndez ¹, Ivan Terol-Villalobos ³, Hector Gutiérrez-Bañuelos ⁴ , Ma. Araiza-Esquivel ¹, Gustavo Espinoza-García ¹, Juan García-Escalante ⁵ and Carlos Olvera-Olvera ^{1,*}

¹ Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, Mexico; germandiazflores@gmail.com (G.D.-F.); lsolis@uaz.edu.mx (L.S.-S.); domag5@hotmail.com (D.G.-M.); maraizae@gmail.com (M.A.-E.); gustavo.esga@hotmail.com (G.E.-G.)

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76010, Mexico; mendijor@uaq.mx

³ Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76230, Mexico; ge.d.1@hotmail.com

⁴ Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98500, Mexico; gtzbahector@hotmail.com

⁵ IDGreen Company, Querétaro 76915, Mexico; jjgescalante@gmail.com

* Correspondence: colvera@uaz.edu.mx

Received: 7 October 2019; Accepted: 23 October 2019; Published: 24 October 2019



Abstract: Modeling and simulation of internal variables such as temperature and relative humidity are relevant for designing future climate control systems. In this paper, a mathematical model is proposed to predict the internal variables temperature and relative humidity (RH) of a growth chamber (GCH). Both variables are incorporated in a set of first-order differential equations, considering an energy-mass balance. The results of the model are compared and assessed in terms of the coefficients of determination (R^2) and the root mean squared error (RMSE). The R^2 and RMSE computed were $R^2 = 0.96$, $R^2 = 0.94$, RMSE = 0.98 °C, and RMSE = 1.08 °C, respectively, for the temperature during two consecutive weeks; and $R^2 = 0.83$, $R^2 = 0.81$, RMSE = 5.45%RH, and RMSE = 5.48%RH, respectively, for the relative humidity during the same period. Thanks to the passive systems used to control internal conditions, the growth chamber gives average differences between inside and outside of +0.34 °C for temperature, and +15.7%RH for humidity without any climate control system. Operating, the GCH proposed in this paper produces 3.5 kg of wet hydroponic green forage (HGF) for each kilogram of seed (corn or barley) harvested on average.

Keywords: modeling and simulation; temperature and relative humidity; growth chamber; hydroponic green forage; growing system

1. Introduction

The development of mathematical models and their subsequent simulations are used to predict the behavior of certain variables in a determinate system that changes over time. In our case, such a system is the growth chamber (GCH) presented in Figure 1. Due to the complex interactions carried out among the variables, such as temperature, humidity, radiation, carbon dioxide, water, nutrients, pests, diseases, and weeds, among others, it is necessary to identify and analyze them in subsystems. Several authors [1–20] have characterized the subsystems from different perspectives—for example, climate, nutrition, and irrigation. Models are used to achieve detailed knowledge of all interactions and processes. In some research, through modeling and simulation, the effects of environmental control

techniques are analyzed to maintain the following critical variables: Temperature, humidity, lighting, and carbon dioxide concentration [1,2]. Other research projects predict the behavior of one or more variables and provide an appropriate response to keep these variables within the desired limits [3–5]. Most of the research on modeling and simulations has mainly been developed for greenhouses [6–11] to predict the internal environmental conditions of enclosures utilized for cultivation and plant growth. Several studies from the perspective of different environments of models have also been pursued, with the objective of knowing the behavior of the internal variables, such as temperature and relative humidity, that will serve as support to later define an adequate strategy for controlling the growth conditions within an enclosure. Although the type of crop is not defined explicitly, its influence is implicit, given its inherent condition in the models. These studies have implemented different approaches to develop these models, such as neural networks, genetic algorithms, and neuro-fuzzy models [12–16], where the object of study centers on natural ventilation, forced ventilation, cooling evaporators, or systems that integrate calefaction [17–20], to mention a few of them. On the other hand, there are alternative studies not developed for greenhouse environments, and proposed by some authors to model and simulate temperature and humidity [21–25].

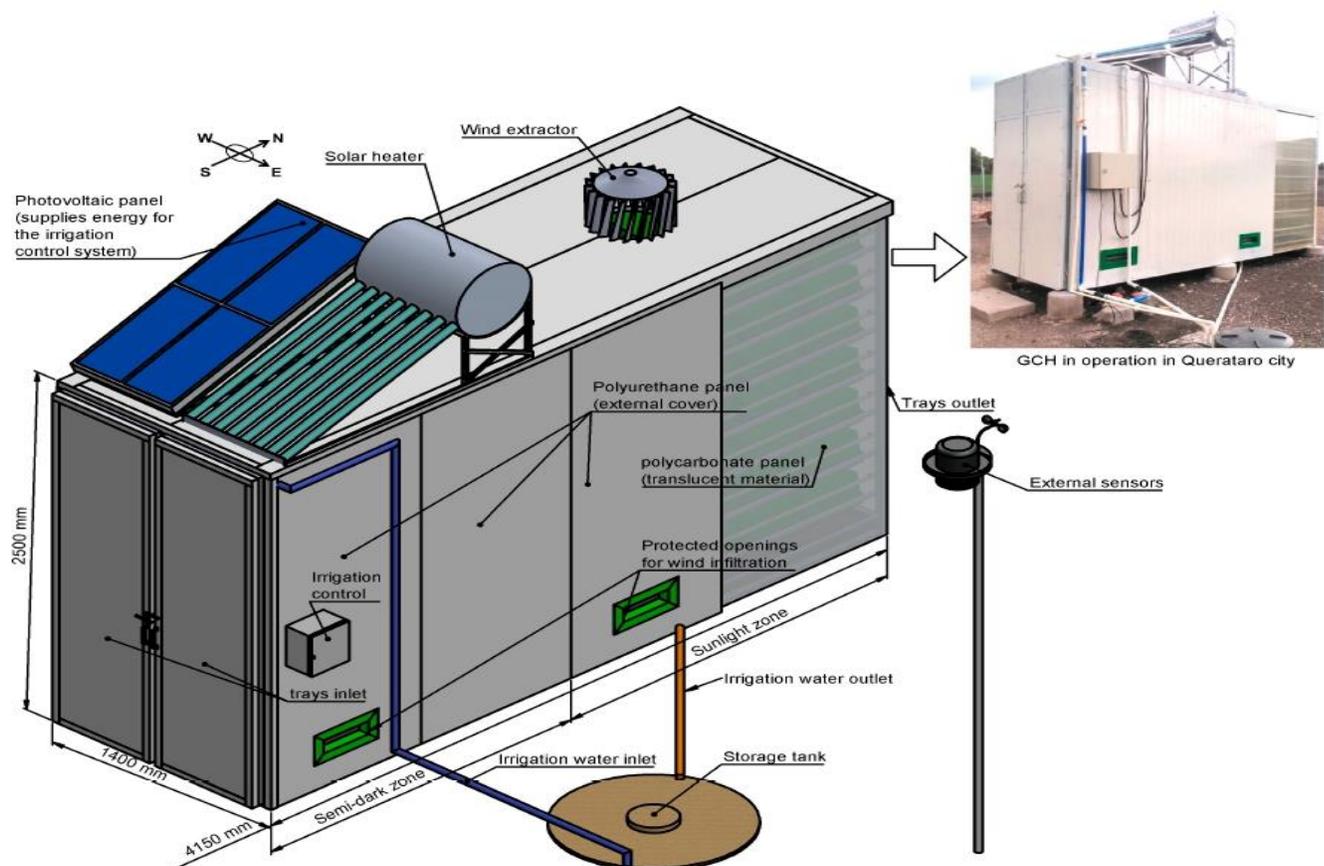


Figure 1. Schematic of the experimental setup of the growth chamber used to produce hydroponic green forage.

In our proposal, physical principles are used to obtain a mathematical model of the GCH. Due to this, its internal environment is described employing differential equations [26]. This methodology permits researchers to obtain an environmental model of the GCH, relating outside variables (air temperature, relative humidity, global radiation, and wind speed), inside variables (for example, evapotranspiration), and the optical and thermal properties of building materials, along with the volume and surface of the

enclosure. In our research, the resolution of equations and the implementation of the simulations were carried out with Matlab®(R2010A, MathWorks, Natick, MA, USA) software.

In this study, the authors propose a novel GCH that integrates the concept of renewable energy taking advantage of natural resources for its operation because it uses a roof-mounted solar panel. Due to its design, the GCH uses a passive system to control temperature and humidity. The GCH does not contain artificial heating, cooling, or lighting systems, and might be relevant to the production of hydroponic green forage. A mathematical model has been developed to estimate the inside air temperature and relative humidity of the GCH. The confidence in the accuracy and reliability of the model is established comparing the simulated values and measured values through the coefficient of determination (R^2), and the root mean squared error (RMSE). Results of the comparison reveal good agreement between experimental measurement data and those obtained by the mathematical model. It needs clarifying that it is not the main objective of the current research to develop a complex model with a high level of detail and accuracy, but a simple model that gives satisfactory predictions for realistic environmental responses of the air temperature and humidity inside the GCH. The application of the simulation results of this study may be regarded as a reference to optimize the prediction model of temperature and humidity in other growth chambers under study.

2. Materials and Methods

This research was carried out on a farm in Querétaro, México ($20^{\circ}32'57.4''N$, $100^{\circ}30'11.7''W$), where the GCH is in the open air. To clarify the explanation, this section consists of the following four parts: (1) Growth chamber, in this part describes the camera and all its components; (2) Instrumentation and environmental data, which deals with the sensors used in the study, along with the equation to filter the information; (3) Environmental model, here the mathematical expressions corresponding to the equations of temperature and relative humidity are introduced to analyze the interior of the GCH; and (4) Initial conditions, in which the initial conditions are established to solve the differential equations.

2.1. Growth Chamber

This study centers on the prediction and measurement of the internal air temperature and relative humidity in a GCH built on a farm in the open air, in Querétaro, México.

Its purpose is the growth and development of temporary crops (TCs) of hydroponic green forage (HGF). It is worth mentioning that the crop term used in our work is employed according to the FAO definition (available from <http://www.fao.org/es/faodef/fdef11e.htm>), i.e., forage used mainly as part of the animal diet, and that can become temporary. Figure 1 presents the scheme of the proposed chamber, and a description is given as follows: Due to its design, the GCH uses passive systems to control the temperature, humidity, and wind speed based on filtering outside conditions without operating any climate control system (heating, cooling, or evaporative).

The GCH integrates the concept of renewable energy because it counts with technology that takes advantage of the natural resources for its operation. Furthermore, it is built with an anticorrosive metallic structure with a tubular rectangular profile in stainless steel of 40×40 mm, caliber 12, resulting in rigidity. Additionally, covered with a sandwich-type panel of galvanized steel metal faces and a rigid insulating core of high-density polyurethane PUR ($40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) with a thickness of 40 mm, model PF600-40L of the company PAINEL2000, which is useful for isolating the interior from the extreme conditions of the elements. On the roof are placed a solar collector, a polycrystalline solar panel of the 125 W brand EPCOM model EPL12512, and a wind extractor brand ATCFANS model BK2000-14 of anodized aluminum. The photovoltaic system ensures the implementation and operation of the GCH anywhere, without relying on conventional electricity, complemented by the following three elements: (1) A solar charge controller with pulse width modulation (PWM), manufactured by PHOCOS model CX40; (2) a RALLY 1200 W inverter model 7466 to convert 12 V DC to 120 V AC; and (3) two solar batteries of a deep cycle of absorbent glass mat (AGM), brand CONER model 31H, 12 V, and 115 Ah. The extractor only rotates because of the external wind present in the GCH installation

site (the movement of the wind extractor is ignored, due to the temperature differential). Therefore, ventilation is said to be natural. The lower part of each wall of the chamber (right and left) has two openings, with a stainless-steel mesh 40, SORFORD brand, that prevents the pests or objects entry since the GCH is outdoors. Due to the wind extractor, air enters through these openings and flows upwards. A high-density geomembrane (HDPE) of 1 mm thickness manufactured by GSE covers the wood floor.

The interior of the GCH is divided into two zones: The first part offers semi-dark conditions and must be kept like this during the first eight days, when the seed begins to germinate, and a second part, where the forage shoots are exposed to sunlight to complete their development from the ninth day to the fifteenth day. The lighting is natural thanks to the sun rays that cross the cellular polycarbonate panel (SKYFLEX U-profile 6 mm). In the interior of the GCH, there are 12 rails used to displace the trays horizontally, distributed in two sections, with six rails per section, and rails are separated vertically by 31 cm.

The growth of the HGF takes place in trays of 60×40 cm and 7.5 cm high, manufactured by HYDROCULTURA. Each tray has a 35.5° tilt angle with holes in the bottom, allowing water to flow and drain; unlike conventional production systems that use the practice of run and waste irrigation, i.e., the water on the floor is not reused and wasted. Besides, there is a system for the recirculation of water, which lets considerable water savings. This is one of the advantages of the proposed production system.

Additionally, the GCH has a system of irrigation with the following two components: (1) A storage tank of 1000 L, and (2) a submersible water pump of the 250 W brand ORANGEPUMPS model CSP250C-4. The distribution of the water is carried out with PVC tubes that are 13 mm in diameter, with perforations every 64 cm, where there are installed sprinklers manufactured by the EVERGREEN model MS 8009. The irrigation is conducted using pure water, without nutrients and fertilizers.

The GCH is defined as follows: The GCH is a prototype aimed at mitigating or preventing production losses for small and medium livestock producers, or producers of small animals. It has the following characteristics: It is a small chamber, people cannot walk inside it, and only a part of it contains translucent material. Thanks to its shape and size, the chamber can be relocated without disarming it in its entirety, and for its installation and startup, little time is required. The GCH makes efficient use of space due to the structure composed of several layers in a vertical direction. Due to the optimal isolation of the camera, it exhibits an efficient energy consumption.

On the other hand, one would think that a GCH is like a greenhouse; however, there are several differences. For example, a greenhouse is a closed, static, and accessible on foot, and the light crosses the translucent glass or the plastic, letting use of the effect of solar radiation. This structure covers the crop and has at least one device that can be manipulated to control the variables of the environment, nutritional or biotic or both, that influence the growth and development of the crop. Another marked difference between a greenhouse and the GCH is in the commercial aspect because a greenhouse seeks large-scale production that generates economic value, whereas a GCH is used to ensure the production of animal food.

2.2. Instrumentation and Environmental Data

The GCH counts with a temperature sensor and a data logger factory certified and calibrated brand EXTECH model RHT10. The sensor location is 2.08 m behind from the doors, 1.25 m above the floor, and 0.7 m in front of the walls. This device is useful to register and store temperature and relative humidity each day. The resolution and accuracy of the temperature sensor are 0.1°C and $\pm 1.0^\circ\text{C}$, respectively. The resolution of the relative humidity sensor is 0.1%RH. The accuracy changes according to the range of measurement; for the range of 60 to 80%RH, it is of $\pm 3.5\%$ RH, and for 80 to 100%RH, it is of $\pm 5.0\%$ RH. The external weather conditions are obtained from a station Davis Vantage Pro weather, model 6162. This is located outside of the GCH, 4 m to the left from the wall and 3 m from the ground, and permits to capture the following data: Temperature, relative humidity, solar radiation, and wind speed.

In this study, data collected on 11 November 2015 and 2 February 2016 were used to carry out the characterization of the model for simulation purposes. These data were selected because when compared with the information obtained on the other days, they presented major disturbances. The temperature and humidity were acquired every 5 min (measurement interval), obtaining a total of 288 measurements per variable in a day. Other data collected during two consecutive weeks, from 3 July 2016 to 16 July 2016 (15 days were selected because this period corresponds to a cycle of production of HGF), were used to validate the model, i.e., 4320 measurements in 15 days per variable. This measurement interval for data collection was established based on the work reported in [2,8].

It is also worth mentioning that the recorded data were filtered to avoid unwanted peaks during the simulation process. The filter used is called median–mean, and it is useful in statistical analysis. This filter computes the mean filter first, followed by the median operator. Formally, this is expressed by:

$$\xi_{\mu B}(f)(x) = XM_{\mu B}(\bar{X}_{\mu B}(f))(x) \tag{1}$$

where, $\xi_{\mu B}$ represents the median–mean filter size μ ; $XM_{\mu B}$ is the median filter size μ ; $\bar{X}_{\mu B}$ denotes the mean filter size μ ; f represents the input vector; x is the evaluation point; B symbolizes the elemental structuring element; and μ is a size criterion, e.g., if $\mu = 1$, the number of elements is $2\mu + 1 = 3$, and if $\mu = 2$, then the number of elements is $2\mu + 1 = 5$, etc. The filter expressed in Equation (1) was implemented in Matlab® R2010A.

2.3. Environmental Model

The internal environment of the GCH can be described using a system of two differential equations of the first order, which characterize the behavior of the air temperature and relative humidity [21,27,28] following the mass and energy balances considering the interactions illustrated in Figure 2. External climatic conditions influence this model, as well as the location, orientation, and size of the GCH. The simplified environmental model described in this section takes into consideration next assumptions:

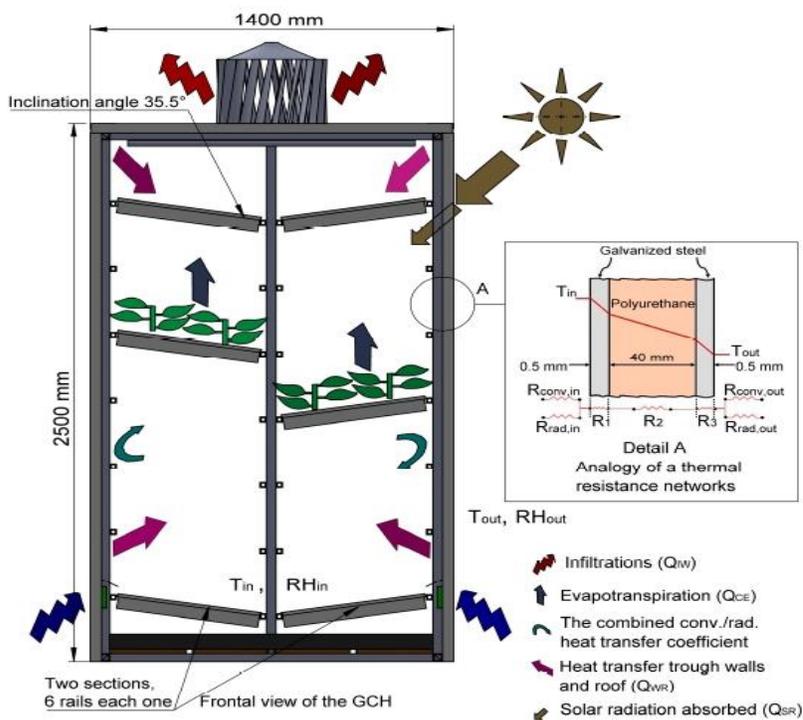


Figure 2. Mass and heat interactions between inside and outside variables of the growth chamber.

(1) In the temperature model of the air, the heat sources are the heat absorbed through the translucent surfaces, the evapotranspiration of the TC, and the heat transfer through walls and ceiling, while the main source of heat loss is the ventilation. The condensation of the walls (as a result of latent heat) is considered as a parameter neither the water nebulization nor evaporation on the surface of the soil.

(2) The model of humidity in the air considers the evapotranspiration of the crop and ventilation as the main cause of humidity gain and loss, respectively.

(3) The crop evapotranspiration variable utilized in the environmental model comes from some relationships proposed by other authors. Such variables satisfy to be a linear function of the global radiation.

(4) The mathematical relationships of physical processes such as ventilation are simplified. The wind speed within the GCH is considered homogeneous, without considering the multiple crop layers in the GCH. Natural ventilation temperature is despised, due to the small effect of it, with respect to that produced for the wind. Empirical relationships are used to model this physical phenomenon.

(5) The internal temperature and humidity models consider a uniform homogeneous distribution of variables inside the GCH.

2.3.1. The Internal Air Temperature Model

Figure 2 illustrates that the GCH gains heat due to solar radiation absorbed through the translucent surfaces (Q_{SR}), the heat provided by crop evapotranspiration (Q_{CE}), and the heat transfer through walls and roof (Q_{WR}), while the heat losses are due to infiltrations and the effect of wind (Q_{IW}). The equation proposed for modeling the behavior of the internal temperature is the following:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_a H} [Q_{SR} + Q_{CE} + Q_{WR} - Q_{IW}] \quad (2)$$

where c_p is the specific heat at constant pressure ($\text{J} \cdot \text{kg}_{\text{dry air}}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ_a is the air density ($\text{kg}_{\text{dry air}} \cdot \text{m}^{-3}$), H represents the average height of the GCH (m).

The heat absorbed by the translucent surface of the GCH due to solar radiation is estimated using the next equation [29,30]:

$$Q_{SR} = C_1 Q_{GR} \quad (3)$$

where Q_{GR} is the external global radiation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), and C_1 is a dimensionless coefficient that relates to the energy transmittance through the translucent material and it is a property of the materials used during its construction.

According to the literature, there are several mathematical models of evapotranspiration for crops [31–33], some of which are more complex than others. However, the factor that has demonstrated the highest correlation with evapotranspiration is radiation. Based on the work carried out by Jolliet [34], we assume that crop evapotranspiration is a linear function of solar radiation. For this reason, Equation (4) expresses the term that associates the heat contributed by evapotranspiration (Q_{CE}) [29]:

$$Q_{CE} = E = 0.00006 C_1 Q_{GR} + 0.0004 \quad (4)$$

The heat gain through the walls and the ceiling to the interior of the GCH (Q_{WR}) consider (1) the conduction through the wall and roof, and (2) the convection and radiation associated with its surfaces. Equation (5) is defined as [35]:

$$Q_{WR} = \frac{(T_{in} - T_{out})}{R_{total}} \quad (5)$$

where $T_{in} - T_{out}$, defines the temperature difference between inside and outside of the GCH, R_{total} is the total thermal resistance in $\text{m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$. Q_{WR} can be handled using the thermal resistance concept. Figure 2 (Detail A) illustrates the analogy of the thermal resistance networks.

The Equations (6)–(11) represent the concept of the thermal resistance parameter. This concept is employed, e.g., by Sarafraz et al. [36], for estimating the overall heat transfer coefficient ($1/R$). The equations defined in [35] are presented as follows:

$$R_{conv, in} = \frac{1}{h_{conv, in}} \quad (6)$$

$$R_{rad, in} = \frac{1}{h_{rad, in}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{cov, in}^2 + T_{in}^2) \cdot (T_{cov, in} + T_{in}) \quad (7)$$

$$R_1 = R_3 = 1.80 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (8)$$

$$R_2 = R_{Pul} = \frac{b}{K_{mat}} \quad (9)$$

$$R_{conv, out} = \frac{1}{h_{conv, out}} \quad (10)$$

$$R_{conv, out} = \frac{1}{h_{rad, out}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{cov, out}^2 + T_{in}^2) \cdot (T_{cov, out} + T_{in}) \quad (11)$$

where h_{conv} and h_{rad} are the convection and radiation heat transfer coefficients at the surfaces; ε is the emissivity coefficient; σ corresponds to the Stefan–Boltzmann constant; $T_{cov, in}$ $T_{cov, out}$ are the temperatures in the interior and the outside surfaces, respectively; R_1 represents the thermal resistance for the inner and outer sheets of the galvanized steel metal faces with a thickness of 0.5 mm, respectively; b is the thickness of the insulating core; K_{mat} is the declared thermal conductivity with a value of $0.0211 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. The values are in the technical data sheet of the materials.

Since the convection and radiation resistances are parallel to each other, this may cause some complications in the thermal resistance network. By replacing h_{conv} in Equations (6) and (10) by $h_{conv, rad, in}$ and $h_{conv, rad, out}$, which include the effects of radiation on the inner and outer sheets of the galvanized steel metal surfaces of walls and roofs (called surface conductance, which represents the combined convection and radiation heat transfer coefficients), avoids all the complications associated with radiation effect. The common values for $h_{conv, rad, in}$ and $h_{conv, rad, out}$, considering a maximum load, are computed as follows [37]:

$$h_{conv, rad, in} = 8.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \quad (\text{summer or winter}) \quad (12)$$

$$h_{conv, rad, out} = \begin{cases} 34.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} & (\text{winter}) \\ 22.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} & (\text{summer}) \end{cases} \quad (13)$$

According to the consideration made for the radiation effect, the resistance configuration is in series, hence the total thermal resistance is obtained below:

$$R_{total} = R_{conv, rad, in} + R_1 + R_{Pul} + R_3 + R_{conv, rad, out} \quad (14)$$

The energy flow caused by infiltrations and the effect of ventilation is computed below [30]:

$$Q_{IW} = \frac{\varphi_{wind} \rho_a c_p}{A_{LC}} (T_{in} - T_{out}) \quad (15)$$

where φ_{wind} represents the airflow through the apertures of the GCH ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), and A_{LC} is the longitudinal area of the camera (m^2), which is the result of multiplying the width by the height of the GCH.

Subsequently, when replacing Equations (3)–(5) and (15) in Equation (2), the mathematical model to predict the internal air temperature of the GCH is:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot \rho_a \cdot H} \{ (C_1 \cdot Q_{GR}) + (0.00006 \cdot C_1 \cdot Q_{GR} + 0.0004) + \frac{(T_{in} - T_{out})}{R_{total}} - \frac{\varphi_{wind} \cdot \rho_a \cdot c_p}{A_{LC}} (T_{in} - T_{out}) \} \quad (16)$$

2.3.2. The Internal Air Relative Humidity Model

For the relative humidity, the source of water vapor was evapotranspiration from TC (E), and the only water loss from the system was due to ventilation. Then, Equation (17) represents the changes in water vapor produced inside the GCH, i.e.,

$$\frac{d\omega_{in}}{dt} = \frac{1}{H\rho_a} \left[E - \frac{\varphi_{wind}}{A_{LC}} \rho_a (\omega_{in} - \omega_{out}) \right] \quad (17)$$

Equation (4) establishes the crop evapotranspiration E ($\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), $\omega_{in} - \omega_{out}$ represents the difference between the inside and outside absolute humidity of the GCH, and it is calculated utilizing the next equations [38]:

$$\omega_{in} = \frac{RH_{in}}{100} \left[(0.004055) + (0.0001152 \cdot T_{in \text{ sim}}) + (0.00002167 \cdot T_{in \text{ sim}}^2) \right] \quad (18)$$

$$\omega_{out} = \frac{RH_{out}}{100} \left[(0.004055) + (0.0001152 \cdot T_{out}) + (0.00002167 \cdot T_{out}^2) \right] \quad (19)$$

where RH_{in} is the internal relative humidity of the chamber, and $T_{in \text{ sim}}$ is the value simulated by the temperature obtained through Equation (16).

2.4. Initial Conditions

The initial conditions (time $t = 0$) for each one of the state variables of the differential Equations (12) and (14) were assumed to be equal to the measured outside temperature (T_{out}) and humidity (ω_{out}). For instance, when recording measurement data at the time 00:00, with the outside temperature sensor reading 15°C , then $T_{in} = T_{out} = 15^\circ\text{C}$; similarly, it is done for $\omega_{in} = \omega_{out}$. Other initial input values used in these equations were the outside measured variables, such as global radiation and wind speed. Table 1 presents the parameters used in the model.

Table 1. Parameters used for the growth chamber model (GCH).

| Parameters | Meaning | Value (Unit) |
|---------------------------|--|--|
| A_{LC} | Longitudinal area of the GCH | 4.6 (m^2) |
| c_p | Specific heat at constant pressure | 1010 ($\text{J} \cdot \text{kg}_{\text{dry air}}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) |
| $\frac{d\omega_{in}}{dt}$ | Differential of the inside absolute humidity | ($\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dry air}}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) |
| $\frac{dT_{in}}{dt}$ | Differential of the inside temperature | ($\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) |
| E | Evapotranspiration crop | ($\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) |
| Φ | Relative humidity | (%) |
| φ_{wind} | Air flow through the apertures of the GCH | ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) |
| RH_{in} , IRH | Inside relative humidity | (%) |
| RH_{out} | Outside relative humidity | (%) |
| ω_{in} | Inside absolute humidity | ($\text{kg}_{\text{wat vap}} \cdot \text{kg}_{\text{dry air}}^{-1}$) |
| ω_{out} | Outside absolute humidity | ($\text{kg}_{\text{wat vap}} \cdot \text{kg}_{\text{dry air}}^{-1}$) |
| T_{in} , IT | Inside temperature humidity | ($^\circ\text{C}$, K) |
| T_{out} | Outside temperature humidity | ($^\circ\text{C}$, K) |
| C_1 | Coefficient that relates the energy transmittance of glazed material | 0.32 (dimensionless) |

3. Results

To evaluate the performance of the mathematical model, we used two criteria: (1) The coefficient of determination (R^2) obtained through a regression analysis (for the humidity, a fifth-degree polynomial function is used, due to the nonlinear behavior), and (2) the root means squared error (RMSE). These criteria assessed the correlation between simulated and measured values. They are defined as follows:

$$\text{RMSE } T \text{ (}^\circ\text{C)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (T_{in \text{ sim}} - T_{in \text{ mea}})^2} \quad (20)$$

$$\text{RMSE } RH \text{ (\%)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (RH_{in \text{ sim}} - RH_{in \text{ mea}})^2} \quad (21)$$

where $T_{in \text{ sim}}$ and $RH_{in \text{ sim}}$ correspond to the simulated values of the temperature and the relative humidity inside the GCH, respectively, and $T_{in \text{ mea}}$ and $RH_{in \text{ mea}}$ represent the measured values of the temperature and the relative humidity inside the GCH, respectively.

The uncertainties of the experimental results are obtained using the Kline-McClintock equation [39] employed in [36]. Based on the uncertainty analysis, the uncertainties of the $T_{in \text{ sim}}$ and $RH_{in \text{ sim}}$ are 12.8% and 8.1%.

The results section consists of the following four parts: (1) Two days are analyzed in different seasons. The parameter R^2 is computed analyzing the differences between the measured and simulated data; (2) parameters RMSE and R^2 are obtained using the data of two consecutive weeks corresponding to the summer season; (3) internal conditions of the GCH, where a percentage is computed to know how much the temperature and humidity maintain ideal conditions without operating any heating or cooling system; and (4) GCH operation example. Here is illustrated the practical functionality of the proposed GCH.

3.1. Two Days in Different Seasons

The results of the simulation corresponding to the temperature and relative humidity of two days, 11 November 2015 and 2 February 2016, can be seen in Figure 3a,c,e,g, respectively. For each day are taken into account 288 samples of temperature and relative humidity, 1152 samples are considered in total. From the data graphed in Figure 3, the average difference between the simulated value and the measured value is computed, giving a result of $\overline{T_{in \text{ sim}} - T_{in \text{ mea}}} = 0.06 \text{ }^\circ\text{C}$ for the temperature and $\overline{RH_{in \text{ sim}} - RH_{in \text{ mea}}} = -6.1\%RH$ for the relative humidity on a day in autumn, and $\overline{T_{in \text{ sim}} - T_{in \text{ mea}}} = 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ and $\overline{RH_{in \text{ sim}} - RH_{in \text{ mea}}} = -7.9\%RH$ for a winter day. Negative signs reveal an underestimation of the mathematical model, i.e., the simulated value was less than the measured value.

Figure 3b,d,f,h shows the graphs corresponding to regression analysis for the two days considered in the simulation. The coefficients of determination deduced from the data are the following: (1) $R^2 = 0.94$ for the temperatures on an autumn day and $R^2 = 0.99$ for temperatures on a winter day, and (2) $R^2 = 0.97$ for the relative humidity on an autumn day and $R^2 = 0.87$ for the relative humidity on a winter day. Comparing the coefficients obtained in this research concerning those reported in [40], whose values are $R^2 = 0.92$ and $R^2 = 0.87$ for the temperature and relative humidity in a greenhouse, a little improvement was observed in respect to the temperature, and no difference to the relative humidity.

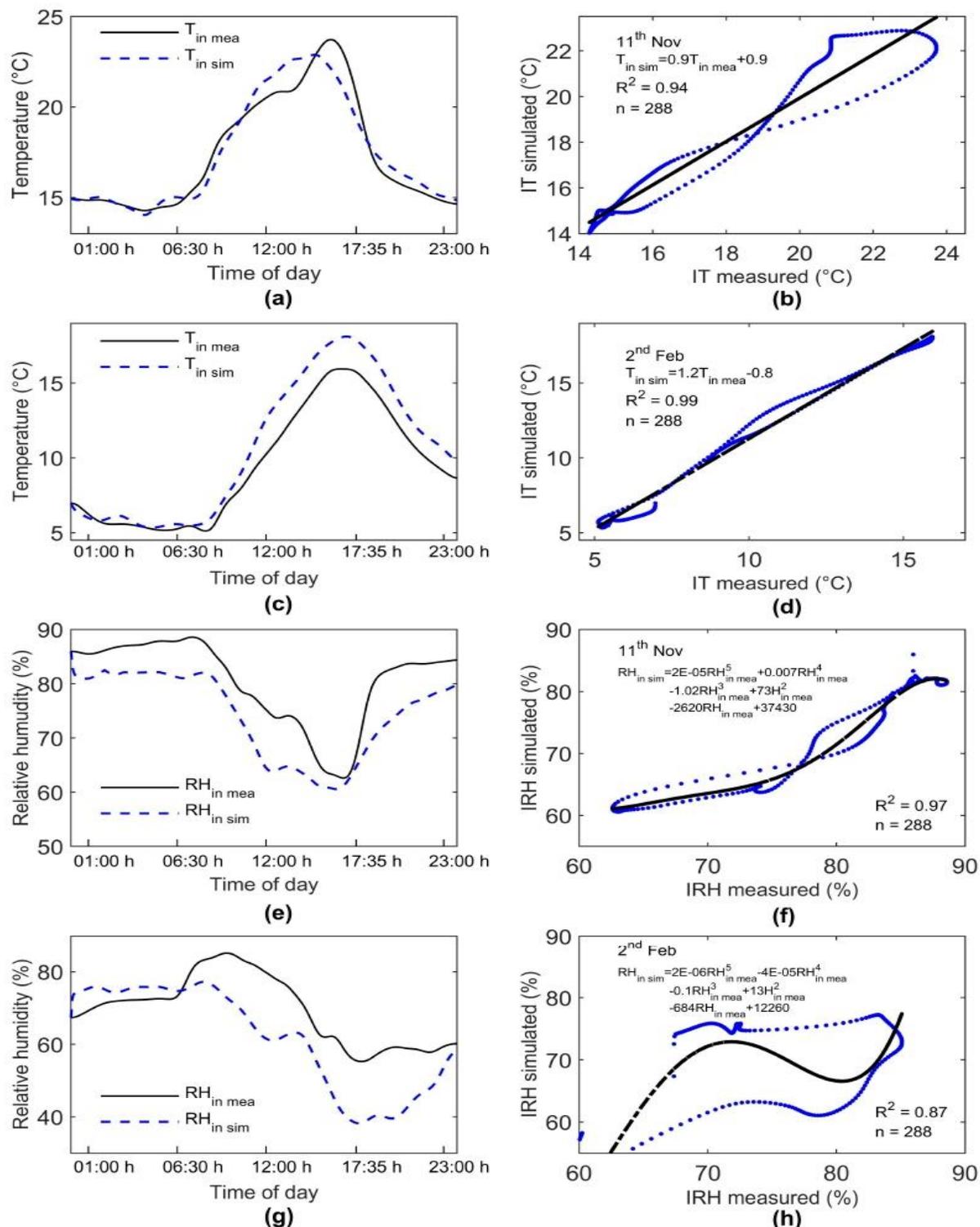


Figure 3. Results of the simulation of temperature and humidity during two days in different seasons (autumn: 11 November 2015 and winter: 2 February 2016). (a) The temperature in autumn. (b) Regression analysis of temperature in autumn, $R^2 = 0.94$. (c) The temperature in winter. (d) Regression analysis of temperature in winter $R^2 = 0.99$. (e) Humidity in autumn. (f) Regression analysis of humidity in autumn, $R^2 = 0.97$. (g) Humidity in winter. (h) Regression analysis of humidity in winter, $R^2 = 0.87$.

3.2. Two Consecutive Weeks

Similar simulations to those presented in Figure 3 are provided in this section, but now considering 15 days. In Figure 4, the corresponding graphs for the temperature ($n = 2016$) and relative humidity ($n = 2016$) for the two weeks (from 3 July 2016 to 16 July 2016) are displayed. In Figure 4, the horizontal lines indicate the days. Figure 4a,c shows a visual check of the measured internal temperature and the simulated (or predicted) internal temperature of the week from July 3 to 9 (first week) and the week from July 10 to 16 (second week), respectively. Figure 4b,d shows the internal temperature regression analysis, with the regression lines that best adjust to the scatter diagram and the linear regression equations with their coefficient of determination values. Similarly, Figure 4e,g shows a visual check of the measured internal relative humidity, and the simulated (or predicted) internal relative humidity of the first and the second week, respectively. Figure 4f,h shows the internal relative humidity regression analysis using a polynomial approximation (to get a best adjust of the data), with the regression lines that best adjust to the scatter diagram and the regression equations with their coefficient of determination values. The RMSE values for the first week are $0.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $5.5\%\text{RH}$, whereas those for the second week are $1.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $5.5\%\text{RH}$. In the same way, the RMSE value of the simulated temperature is less than the value reported in [15], of $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, and a bit higher than the RMSE value of the relative humidity reported in the same paper, with a value of $3.2\%\text{RH}$ for three consecutive days in a greenhouse. The computed RMSE value obtained in our research is slightly higher than that reported in [26], of $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, and lower when compared to the relative humidity of $6.6\%\text{RH}$ for a single day of simulation inside a greenhouse.

Table 2 presents the coefficient of determination and the mean squared errors associated with the obtained simulations through the proposed humidity model, and those obtained from a humidity model that includes (i) a different method to obtain evapotranspiration [32], and (ii) an equation for condensation [41]. In Appendix A, the tests under different scenarios using the mathematical model are presented.

Table 2. Comparative analysis of the results obtained through the proposed humidity model and those obtained from a humidity model that includes (i) a different method of calculating evapotranspiration. Reproduced with permission from [32]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1985, and (ii) an equation for condensation. Reproduced with permission from [41]. International Society for Horticultural Science, 1985.

| Name | 11 November | 2 February | 3 to 9 July | 10 to 16 July |
|---|-------------|------------|-------------|---------------|
| Data number (n) | 288 | 288 | 2016 | 2016 |
| R^2 for T | 0.94 | 0.99 | 0.96 | 0.94 |
| R^2 for RH | 0.97 | 0.87 | 0.83 | 0.81 |
| $^1R^2$ for RH | $^10.90$ | $^10.74$ | $^10.84$ | $^10.83$ |
| RMSE T ($^{\circ}\text{C}$) | 0.78 | 1.47 | 0.98 | 1.08 |
| RMSE RH (%) | 6.53 | 11.64 | 5.45 | 5.48 |
| 1 RMSE RH | 6.60 | 9.83 | 5.25 | 5.27 |
| $\frac{T_{in\ sim} - T_{in\ mea}}{RH_{in\ sim} - RH_{in\ mea}}$ | 0.06 | 1.17 | 0.11 | 0.19 |
| | 6.096 | 7.912 | 1.192 | 0.733 |

¹ Results obtained with another method to calculate evapotranspiration [32] and including condensation [41]. Note: The values obtained of R^2 , RMSE, and differences between simulated and measured are below the resolution of the sensor.

In several studies [6,40], the regression analysis applied to the model has as a linear correspondence, but in our case, due to the fluctuations presented by the data, a polynomial approximation is computed since the behavior does not correspond with a straight line. Table 3 shows the R^2 values calculated using linear regression and a fifth-degree polynomial.

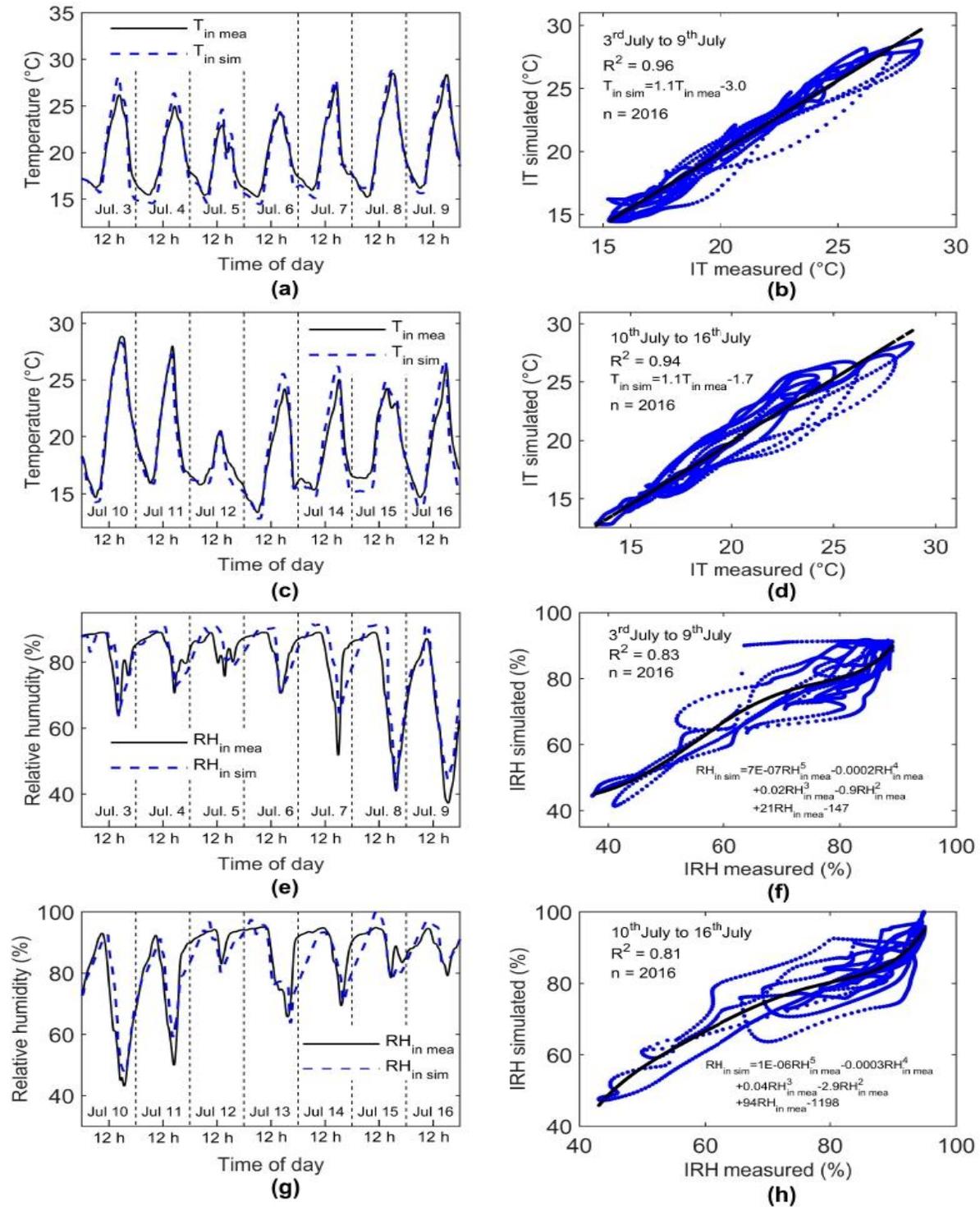


Figure 4. Results of the simulation of the temperature and humidity for two weeks, from 3 July to 9 July and 10 July to 16 July. (a) Temperature simulation for the first week. (b) Regression analysis for the temperature in the first week, $R^2 = 0.94$. (c) Temperature simulation for the second week. (d) Regression analysis of temperature in the second week, $R^2 = 0.92$. (e) Humidity simulation for the first week. (f) Regression analysis for humidity in the first week, $R^2 = 0.83$. (g) Humidity simulation for the second week. (h) Regression analysis for the humidity in the second week, $R^2 = 0.81$.

Table 3. The R² values calculated using linear regression and a fifth-degree polynomial.

| Date | Equation | | R ² | |
|---------------|--------------------|---|----------------|-------------------------|
| | Lineal | Fifth-Degree Polynomial | Lineal | Fifth-Degree Polynomial |
| 11 November | $0.9562x - 2.5738$ | $-2E - 05x^5 + 0.007x^4 - 1.02x^3 + 73.2x^2 - 2620x + 37,430$ | 0.91 | 0.97 |
| 2 February | $1.1936x - 21.365$ | $2E - 06x^5 - 4E - 05x^4 - 0.09x^3 + 13.4x^2 - 685x - 12,260$ | 0.64 | 0.87 |
| 3 to 9 July | $0.8193x + 15.551$ | $7E - 07x^5 - 0.0002x^4 + 0.02x^3 + 0.9x^2 - 22x - 147.64$ | 0.81 | 0.83 |
| 10 to 16 July | $0.7804x + 17.872$ | $1E - 06x^5 - 0.0003x^4 - 0.44x^3 - 2.9x^2 + 95x - 1197.7$ | 0.79 | 0.81 |

In Appendix B, the units of Equations (2) and (17) are verified.

3.3. Internal Conditions of the GCH

The variables that most influence the development of the TC of the HGF are temperature and humidity. In the literature, several studies have been carried out under different conditions of controlled temperature and relative humidity, depending on the application—for example, 21–25 °C and 65–75%RH [42]; 22–26 °C and 50–73%RH [43]; 23–25 °C and 6–70%RH [44]; 18–21 °C and 70%RH [45]. In such studies are reported yields of 7–12 kg of wet HGF per kilogram of harvested seed. The temperature and humidity must keep as stable as possible within a specific range to obtain a good crop inside the GCH. If we establish the ideal range for internal conditions (temperature and humidity), based on the previously cited authors, which is between 20 °C and 25 °C for temperature and 70% and 80% for relative humidity, we find that only 31% of the temperature data measured inside the chamber remain in that ideal internal temperature range, although the average internal temperature measured is 20 °C. In the case of relative humidity, only 14% of the humidity data measured inside the chamber are in the ideal humidity range, while the average of internal relative humidity measured is 82%.

3.4. GCH Operation Example

The TC examples provided in this subsection serve uniquely to illustrate the functionality of the proposed GCH. This paper just reports the results obtained in the field of forage production using the GCH. Our approach is the modeling and simulation of the internal air temperature and internal relative humidity. In this way, any economic, practical, or nutritional analysis is outside of the scope of the paper. The TCs correspond to the *Zea mays* and *Hordeum vulgare* in production cycles of 15 days and 12 days, respectively. The total water used inside the chamber has been generally defined in agronomy [44] as the water added during the irrigation minus the water drained out of the trays. The amount of water used to produce a daily average of forage is equal to the kilograms of wet forage produced on average daily by the GCH among the total water used inside the chamber. Due to the use of recirculation system water, the GCH can produce HGF while saving water. On average, it produces 1.4 kg of corn HGF and 1.7 kg of barley HGF using a liter of water per day in cycles of 15 and 12 days, respectively. Figure 5 illustrates a comparison of the HGF production from *Zea mays* and *Hordeum vulgare*. Additionally, the mass of the seed at the time of harvesting (wet seed after being immersed in water for 48 hours) was registered. During the seeding procedure, the seed was weighed dry and recorded. Another measure considered was the mass of wet forage at the time of being recollected. In Appendix C, there are further details on the obtention of HGF.

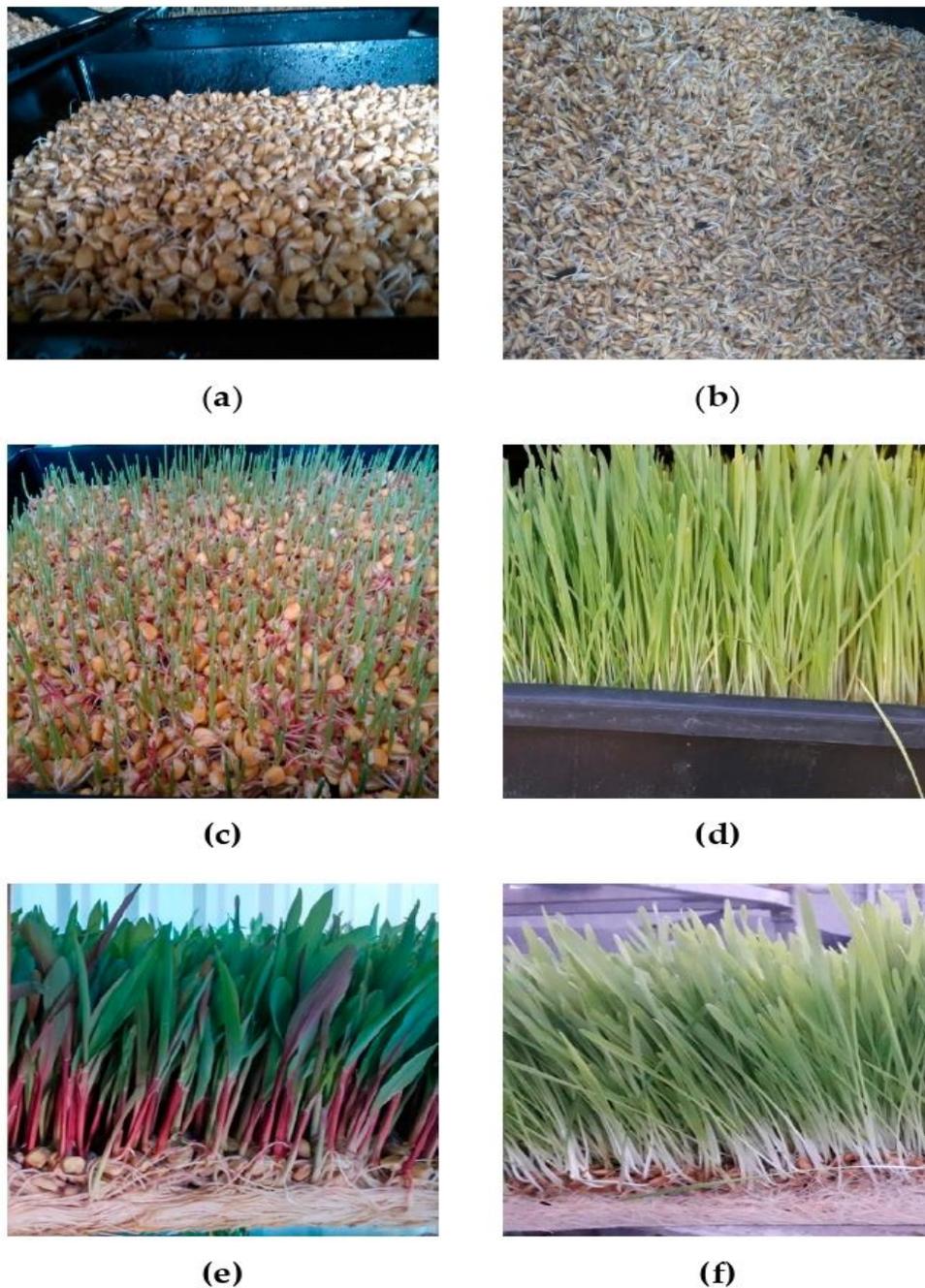


Figure 5. Comparative temporary crops of hydroponic green forage using *Zea mays* and *Hordeum vulgare* in the GCH. (a) The third day of corn. (b) The third day of barley. (c) The tenth day of corn. (d) The tenth day of barley. (e) The fifteenth day of corn. (f) The twelfth day of barley.

Table 4 provides information about the kilograms of wet forage obtained for a TC of corn in a cycle of 15 days. Equally, in Table 5, the results for a TC of barley in a cycle of 12 days are presented. The conversion factor relates dry seed to fresh forage of the same sample produced in the GCH, and differs from the conversion ratio (CR), which considers the concentration of dry matter.

Table 4. Results of the hydroponic green forage of Zea mays for a production cycle of 15 days.

| Sowing | Dry Seed Seeded | Harvest Seed | Wet Forage Recollected | Conversion Factor |
|--------|-----------------|--------------|------------------------|-------------------|
| 1 | 12 kg | 28.99 kg | 43.10 kg | 3.6 |
| 2 | 12 kg | 29.00 kg | 32.30 kg | 2.7 |
| 3 | 12 kg | 29.03 kg | 38.40 kg | 3.2 |
| 4 | 12 kg | 29.02 kg | 35.30 kg | 2.9 |
| 5 | 12 kg | 29.02 kg | 37.22 kg | 3.1 |
| 6 | 12 kg | 29.05 kg | 40.81 kg | 3.4 |
| 7 | 12 kg | 28.02 kg | 39.59 kg | 3.3 |
| 8 | 7 kg | 17.30 kg | 25.55 kg | 3.6 |

Table 5. Results of the hydroponic green forage of Hordeum vulgare for a production cycle of 12 days.

| Sowing | Dry Seed Seeded | Harvest Seed | Wet Forage Recollected | Conversion Factor |
|--------|-----------------|--------------|------------------------|-------------------|
| 1 | 7 kg | 8.80 kg | 24.91 kg | 3.6 |
| 2 | 7 kg | 11.16 kg | 26.74 kg | 3.8 |
| 3 | 7 kg | 10.80 kg | 27.22 kg | 3.9 |
| 4 | 7 kg | 10.68 kg | 27.48 kg | 3.9 |
| 5 | 7 kg | 10.47 kg | 29.75 kg | 4.2 |
| 6 | 7 kg | 10.82 kg | 26.30 kg | 3.8 |
| 7 | 7 kg | 11.14 kg | 24.27 kg | 3.5 |
| 8 | 7 kg | 10.57 kg | 27.68 kg | 3.9 |

A conversion factor of 3.5 is obtained on average, i.e., 3.5 kg of fresh HGF is produced for each kilogram of dry seed planted. The GCH presented in this paper only fulfills the specified objectives, and there is not any interest to carry out a commercial or economic analysis. The performance is low when compared with the results reported in [45], with respect to the proposed hydroponic system, which presented values between 4.93 kg and 7.21 kg of fresh forage for each kilogram of barley grain. In [42], 1 kg of forage seed produces a quantity of wet forage between 7 kg and 9 kg. This occurs because the seed utilized in our project is not certified. Therefore, the percentage of germination is unknown; besides, irrigation was carried out using pure water.

4. Discussion

The results of the model give satisfactory predictions for the air temperature and the humidity in the GCH. Overestimation during the day and underestimation during the night may be due to the unsuitable consideration of a heat transfer coefficient for walls-air or crop-air. Due to the fact that the value of relative humidity depends on the internal airflow through the apertures of the GCH (φ_{wind}) and the evapotranspiration inside of the GCH (E), which is not measured directly in this research, they are only estimated using equations that were developed with experimental data for different conditions than those used in this study.

The results obtained with the proposed humidity model were compared with another system that includes (i) a different method of calculating evapotranspiration [32], and (ii) an equation for condensation [41]. This comparison shows that there are no significant differences in the R^2 parameters obtained by both methods. Our results are similar when applying the mathematical model proposed by Hargreaves [32] where, the authors do not consider analyzing samples in short lapses of time; in our case, every 5 min, radiation was measured—i.e., variations of temperature occur in a longer time, at the beginning and the end of the day, instead of a sampling period. While the equation proposed here is not general, it can be used to compute determined parameters using the captured information of solar radiation. On the other hand, the model introduced by Hargreaves [32] employs tabulated values derived from other experimental procedures.

Moreover, Cengel and Boles [46] have affirmed that, contrary to the relative humidity that varies as the temperature varies, the absolute humidity remains constant in the presence of these variations.

Since the estimation of it is performed using absolute humidity, the results may not reflect the variations that relative humidity would display, and this could explain the low coefficient of determination values for the humidity model.

Similarly, from the point cloud shown in the scatter diagrams for the humidity model in Figure 3f,h and Figure 4f,h, there is a better correspondence between the simulated values and the measured values with a nonlinear function. According to that expressed in [25] and [15], relative humidity is a nonlinear phenomenon because nonlinear equations involved in its modeling govern the transfer of heat and mass. Therefore, linear models like ours suffer from many of the shortcomings by not considering nonlinear effects.

Besides, two factors we have considered for explaining the deviation remaining between the values simulated by the model and the measurements are the following: (1) The complexity of choosing the correct calibration parameters that allow all the state variables that are involved in the model to be adjusted simultaneously, and (2) the assumption that the GCH is a perfect mixing tank, when in fact, the air movement is somewhat limited as a result of the multiple trays inside the GCH. This impacts on the temperature and moisture distribution inside the chamber, since we assume that the air is like a perfectly mixed fluid when there is a spatial distribution.

The simulated data and the values measured experimentally have a good fit. However, the model can be improved. Nevertheless, the use of more complex equations to model humidity within cultivated enclosures does not guarantee better results. For example, in [6], the authors obtained lower coefficients of determination than ours, or the research reported in [40], who obtained slightly higher coefficients than ours. It is so complex to model humidity conditions, that there are even authors who, in their work, only model and simulate temperature, or perhaps they do not show interest in this [11,15,28,30,38].

For 11 November, which corresponds to the autumn season, the measured maximum difference between the internal air temperature of the chamber T_{in} and the external temperature T_{out} was 2.27 °C. However, on average, the internal air temperature was only 0.01 °C lower than the external temperature. In the case of relative humidity, the measured maximum difference between the internal relative humidity (ϕ_{in}) and external relative humidity (ϕ_{out}) was 20.8%. The internal relative humidity was 11.5% higher than the external relative humidity on average. On 2 February, corresponding to the winter season, the measured maximum difference between the internal air temperature of the chamber and the external temperature was 0.69 °C. However, the internal temperature remains 1.1 °C lower than the external temperature on average. On the other hand, the maximum difference between the internal relative humidity of the chamber and the external relative humidity was 33.2%, and the internal humidity was 11.5% higher than the external humidity on average. In the case of the summer season, two consecutive weeks from 3 July to 16 July were analyzed, the measured maximum differences between the interior and exterior of the chamber were 3.82 °C and 38.8% for temperature and relative humidity, respectively. Similarly, the internal air temperature was only higher than the external temperature by an average of 0.34 °C, and the internal relative humidity was maintained at an average of 15.7% higher than the external humidity.

On the other hand, the R^2 data computed with values 0.96 and 0.94 for the temperature model and of 0.81 and 0.80 for the humidity model for two consecutive weeks are not necessarily bad when compared, concerning other index values published in other papers. For example, in the research presented in [6], the R^2 values computed for the internal air temperature were 0.89, 0.80, and 0.80; similarly, R^2 values of 0.52, 0.73, and 0.77 were obtained for simulated humidity in several runs. As can be seen, these R^2 values are lower than those obtained by the model proposed in this paper. Another example is presented in [40], who obtained an R^2 maximum of 0.92 for the internal temperature and 0.87 for the internal relative humidity. These results are slightly higher than those reported in our research. Notice that the R^2 value of 0.80 is quite common among the published works, which derives from the complexity to predict humidity in closed enclosures for crops.

5. Conclusions

The simple and efficient mathematical model proposed in this paper to predict the internal air temperature and relative humidity is a useful tool to know the behavior of these variables within the GCH since, from the obtained results, the predicted values present a good correlation with the measured values and with those reported in the literature when comparing the R^2 and RMSE parameters. The simulation results of this study are useful for the design and optimization of environmental control systems applied to a growth chamber. Next, some conclusions from the results are presented:

(1) During two consecutive weeks of the summer, the coefficients of determination values were $R^2 = 0.96$ and $R^2 = 0.94$ for the model of temperature, and $R^2 = 0.83$ and $R^2 = 0.81$ for the model of the relative humidity. For a winter day, these coefficients were $R^2 = 0.99$ and $R^2 = 0.87$ for air temperature and relative humidity, respectively. Similarly, the results for an autumn day were $R^2 = 0.94$ and $R^2 = 0.97$.

(2) The RMSE values for the temperature model were 0.98 ($^{\circ}\text{C}$) and 1.08 ($^{\circ}\text{C}$) during two consecutive weeks of summer, and 5.45 (%RH) and 5.48 (%RH) for the model of the humidity in the same period of measure. For an autumn day, the RMSE values computed were 0.78 ($^{\circ}\text{C}$) and 6.5 (%RH) for temperature and humidity, respectively. For a winter day, the RMSE values were 1.47 ($^{\circ}\text{C}$) and 11.6 (%RH).

(3) The average temperature differences between the simulated and measured air temperatures and simulated and measured relative humidity were no less than 0.1 $^{\circ}\text{C}$ and 1.2% RH for the period from the 3 to 9 July, and for the period from the 10 to 16 July, the differences were no less than 0.2 $^{\circ}\text{C}$ and less than 0.7% RH. Equally, the average differences were more than 0.06 $^{\circ}\text{C}$ (below the resolution of the sensor) and 6.1% RH, corresponding to an autumn day, and for a winter day, the results were no more than 1.2 $^{\circ}\text{C}$ and less than 7.9% RH.

(4) With the use of GCH, the growth of forage in different places and times of the year can be guaranteed, regardless of climatic conditions. Although the interior of the chamber, on average, was only a little colder in autumn ($\overline{(T_{in} - T_{out})} = -0.01$ $^{\circ}\text{C}$, below the resolution of the sensor) and winter ($\overline{(T_{in} - T_{out})} = -1.1$ $^{\circ}\text{C}$) and only slightly hotter in summer ($\overline{(T_{in} - T_{out})} = +0.3$ $^{\circ}\text{C}$), this did not prevent it from fulfilling its objective of producing HGF. It is worth emphasizing that the interior was always wet compared to the external conditions that occurred in the place of experimentation, so materials selected for the construction of the GCH are adequate.

(5) The results obtained in the production of HGF are interesting because, despite not having an environmental control, not using certified seed, and using water without nutrients, the average production rate of 3.5 kg of wet HGF was achieved for each kilogram of seed (corn or barley) harvested.

Author Contributions: G.D.-F. performed the experiments and wrote the paper. J.M.-S. supervised the experiments and analyzed the data. L.S.-S. revised and edited the paper. D.G.-M. contributed with the materials and original draft preparation. I.T.-V. revised and edited the paper. H.G.-B. revised and edited the paper. M.A.-E. revised and edited the paper. G.E.-G. obtained the resources. J.G.-E. revised and edited the manuscript. C.O.-O. supervised and managed the project.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: The authors thank CONACYT for the scholarship number 326183 and the Master's program in Engineering Sciences SEP-CONACYT-PNPC-2852. The authors also thank the IDGREEN company for providing the use of their facilities.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Appendix A

Four scenarios are presented below, considering the variables Q_{SR} , Q_{WR} , Q_{IW} , and Q_{CE} . They are added gradually until all of them are completed.

The first scenario, the temperature action does not consider ventilation, irrigation, or forage inside the GCH, i.e., only the heat flowing through the walls, ceilings, and translucent surfaces intervene. Figure A1a present the result, and Equation (2) is written as follows:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_a H} \left\{ C_1 Q_{GR} + \frac{(T_{in} - T_{out})}{R_{total}} \right\}, \quad (A1)$$

In the second scenario, natural ventilation without applying irrigation and forage is considered. Here, the variable that relates to the losses due to infiltrations of ventilation intervenes. In Figure A1b, is presented the result, and Equation (2) is expressed as:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_a H} \left\{ C_1 Q_{GR} + \frac{(T_{in} - T_{out})}{R_{total}} - \frac{\varphi_{wind} \rho_a c_p}{A_{LC}} (T_{in} - T_{out}) \right\}, \quad (A2)$$

In the first and second scenarios, an empty GCH is analyzed, so the heat provided by crop evapotranspiration does not intervene.

Third and fourth scenarios: These include all the variables and the contribution from crop evapotranspiration. The results are displayed in Figure A1c,d, respectively. Notice that better simulations occur when increasing the variable number and this indicates that at least four inputs are necessary for the development of a general model. Table A1 shows the coefficients of determination and the variables that intervene in each one of the scenarios.

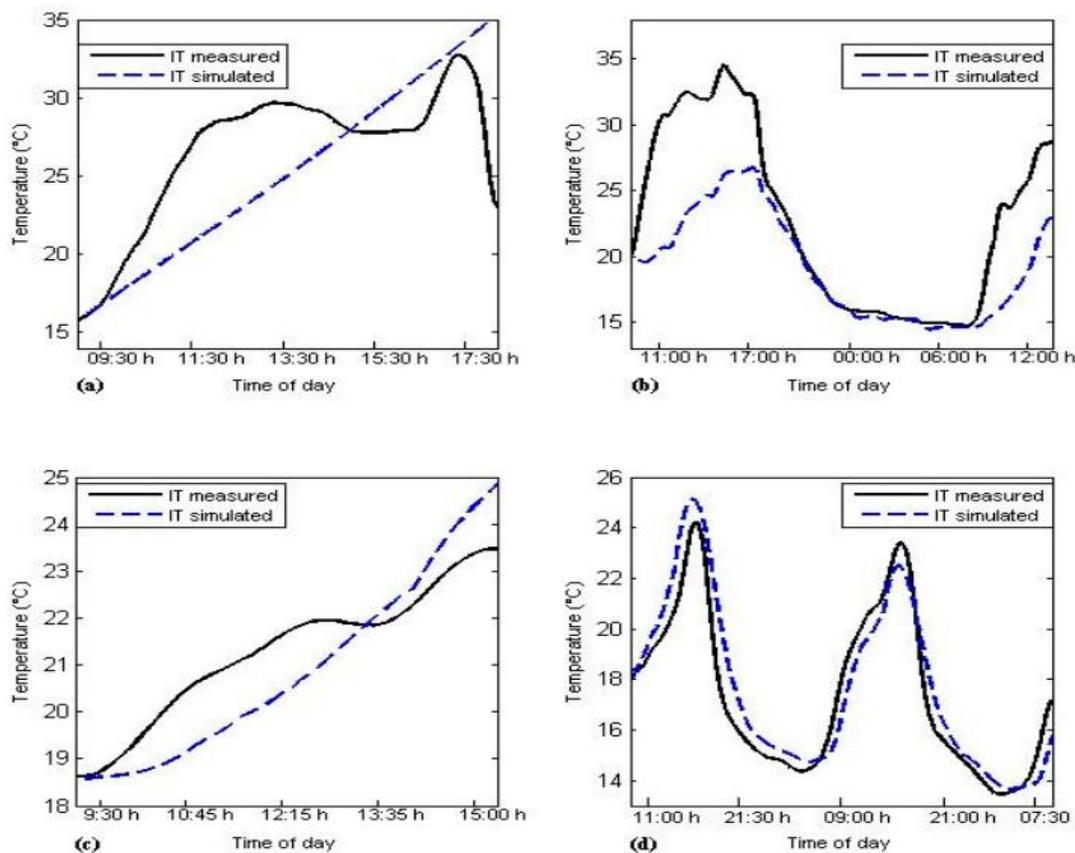


Figure A1. Model behavior in multiple scenarios. (a) The first scenario, where the growth chamber is empty. (b) The second scenario, where only is considered natural ventilation. (c,d) Third and fourth scenarios, when all variables in the simulation are included.

Table A1. Comparison of simulated and measured values under different scenarios.

| Scenarios | R ² | RMSE | Variables | Data Number | Date |
|-----------|----------------|------|---|-------------------------|------------------------|
| 1 | 0.53 | 4.15 | Q _{SR} and Q _{WR} | 553, every minute | 8 August 2015 |
| 2 | 0.82 | 5.04 | Q _{SR} , Q _{WR} , and Q _{IW} | 1722, every minute | 20 to 21 August 2015 |
| 3 | 0.86 | 0.92 | Q _{SR} , Q _{WR} , Q _{IW} , and Q _{CE} | 75, every five minutes | 11 August 2015 |
| 4 | 0.91 | 1.04 | Q _{SR} , Q _{WR} , Q _{IW} , and Q _{CE} | 582, every five minutes | 12 to 14 November 2015 |

Appendix B

In this appendix the units of Equations (2) and (17) of the mathematical model are explained in detail.

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_a H} [Q_{SR} + Q_{CE} + Q_{WR} - Q_{IW}],$$

$$\frac{d\omega_{in}}{dt} = \frac{1}{H \rho_a} \left[E - \frac{\varphi_{wind}}{A_{LC}} \rho_a (\omega_{in} - \omega_{out}) \right],$$

Table A2. Units of the equations.

| Parameter | Description | Units |
|------------------------------------|--|--|
| Q _{SR} | C ₁ Q _{GR} | $\frac{W}{m^2}$ |
| Q _{CE} | 0.00006C ₁ Q _{GR} + 0.0004 | $\frac{W}{m^2}$ |
| Q _{WR} | $\frac{(T_{in} - T_{out})}{K_{total}}$ | $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) (^{\circ}C) = \frac{W}{m^2}$ |
| Q _{IW} | $\frac{\varphi_{wind} \rho_a c_p}{A_{LC}} (T_{in} - T_{out})$ | $\left(\frac{m^3}{s} \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{1}{kg \cdot K}\right) (K) = \frac{J}{s \cdot m^2} = \frac{W}{m^2}$ |
| E | defined as a linear function of global radiation | $\frac{kg_{wat vap}}{m^2 \cdot s}$ |
| ω _{in} - ω _{out} | relationship between the amount of water vapor contained in a unit of dry air mass | $\frac{kg_{wat vap}}{kg_{dry air}}$ |
| φ _{wind} | represents the air flow through the apertures of the GCH | $\frac{m^3}{s}$ |
| ρ _a | air density | $\frac{kg_{dry air}}{m^3}$ |
| C _p | specific heat at constant pressure | $\frac{J}{kg \cdot K}$ |
| H | average height of the GCH | m |

Now, we replace the units of each parameter in Equation (2):

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{\frac{J}{kg \cdot K} \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot m} \cdot \left[\left(\frac{W}{m^2} + \frac{W}{m^2} + \frac{W}{m^2} \right) - \frac{W}{m^2} \right]$$

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{K \cdot m^2}{J} \cdot \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

It should be remembered that when $W = \frac{J}{s}$, then

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{K \cdot m^2}{J} \cdot \left(\frac{J}{s} \cdot \frac{1}{m^2} \right)$$

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{K}{s}$$

For Equation (17), we have

$$\frac{d\omega_{in}}{dt} = \frac{1}{m \cdot \frac{kg_{dry air}}{m^3}} \left(\frac{kg_{wat vap}}{m^2 \cdot s} \right)$$

$$\frac{d\omega_{in}}{dt} = \frac{m^2}{kg_{dry\ air}} \cdot \frac{kg_{wat\ vap}}{m^2 \cdot s}$$

$$\frac{d\omega_{in}}{dt} = \frac{1}{s} \cdot \frac{kg_{wat\ vap}}{kg_{dry\ air}}$$

Appendix C

Appendix C describes the seeding procedure. Consider maize seed (*Zea mays*) in a production cycle of 15 days. The process of the production of HGF was carried out through the following procedure: (1) Screening the seed: The seed was sieved to eliminate foreign agents; (2) cleaning of the seed: Impurities and fragments of seed not removed with the sieve were manually eliminated; (3) disinfecting and washing: Seeds were washed using tap water, and they were immersed posteriorly, in a solution of sodium hypochlorite for 10 min; (4) seed immersion: Corn seed was soaked in a container with water for 48 h to speed up germination, and posteriorly, water was changed after 24 h; (5) sowing in trays: The seed was moved to the cleaned and disinfected plastic trays and distributed without exceeding 1 cm in height; (6) harvesting: Once the trays contained the seeds, they were transported immediately to the interior of the GCH. The trays were situated in a semi-dark place on the rails (see Figure 1), advancing horizontally every time when placed inside; (7) irrigation: The micro-sprinklers were activated for 2 min each, with a total of eight irrigations per day; (8) growth: From the third day, the buds of the seedlings started growing, until completing their cycle on the fifteenth day.

During the production cycle, the variables of interest, humidity, and temperature in the GCH were collected.

References

- Bennis, N.; Duplaix, J.; Énéa, G.; Haloua, M.; Youlal, H. Greenhouse climate modelling and robust control. *Comput. Electron. Agric.* **2008**, *61*, 96–107. [\[CrossRef\]](#)
- Van Beveren, P.; Bontsema, J.; Van Straten, G.; Van Henten, E. Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Appl. Energy* **2015**, *159*, 509–519. [\[CrossRef\]](#)
- Van Straten, G.; Challa, H.; Buwalda, F. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Comput. Electron. Agric.* **2000**, *26*, 221–238. [\[CrossRef\]](#)
- Van Straten, G.; Van Willigenburg, G.; Van Henten, E.; Van Ooteghem, R. *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2010.
- Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Guzmán, J.; Ramírez-Arias, A. *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016.
- Luo, W.; De Zwart, H.F.; Daii, J.; Wang, X.; Stanghellini, C.; Bu, C. Simulation of Greenhouse Management in the Subtropics, Part I: Model Validation and Scenario Study for the Winter Season. *Biosyst. Eng.* **2005**, *90*, 307–318. [\[CrossRef\]](#)
- Carlini, M.; Castellucci, S. Modelling and Simulation for Energy Production Parametric Dependence in Greenhouses. *Math. Probl. Eng.* **2010**, *2010*, 1–28. [\[CrossRef\]](#)
- He, F.; Ma, C. Modeling greenhouse air humidity by means of artificial neural network and principal component analysis. *Comput. Electron. Agric.* **2010**, *71*, S19–S23. [\[CrossRef\]](#)
- Nebballi, R.; Roy, J.; Boulard, T. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renew. Energy* **2012**, *43*, 111–129. [\[CrossRef\]](#)
- Kıyan, M.; Bingöl, E.; Melikoğlu, M.; Albostan, A. Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink. *Energy Convers. Manag.* **2013**, *72*, 147–155. [\[CrossRef\]](#)
- Guo, J.; Liu, Y.; Lü, E. Numerical Simulation of Temperature Decrease in Greenhouses with Summer Water-Sprinkling Roof. *Energies* **2019**, *12*, 2435. [\[CrossRef\]](#)
- Linker, R.; Seginer, I. Greenhouse temperature modeling: A comparison between sigmoid neural networks and hybrid models. *Math. Comput. Simul.* **2004**, *65*, 19–29. [\[CrossRef\]](#)
- Coelho, J.P.; Oliveira, P.D.M.; Boaventura-Cunha, J. Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm. *Comput. Electron. Agric.* **2005**, *49*, 330–344. [\[CrossRef\]](#)

7. Referencias

1. Bennis, N.; Duplaix, J.; Énéa, G.; Haloua, M.; Youlal, H. Greenhouse climate modelling and robust control. *Comput. Electron. Agric.* **2008**, 61, 96–107.
2. Van Beveren, P.; Bontsema, J.; Van Straten, G.; Van Henten, E. Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Appl. Energy* **2015**, 159, 509–519.
3. Van Straten, G.; Challa, H.; Buwalda, F. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Comput. Electron. Agric.* **2000**, 26, 221–238.
4. Van Straten, G.; Van Willigenburg, G.; Van Henten, E.; Van Ooteghem, R. *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2010.
5. Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Guzmán, J.; Ramírez-Arias, A. *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016.
6. Luo, W.; De Zwart, H.F.; Daii, J.; Wang, X.; Stanghellini, C.; Bu, C. Simulation of Greenhouse Management in the Subtropics, Part I: Model Validation and Scenario Study for the Winter Season. *Biosyst. Eng.* **2005**, 90, 307–318.
7. Carlini, M.; Castellucci, S. Modelling and Simulation for Energy Production Parametric Dependence in Greenhouses. *Math. Probl. Eng.* **2010**, 2010, 1–28.
8. He, F.; Ma, C. Modeling greenhouse air humidity by means of artificial neural network and principal component analysis. *Comput. Electron. Agric.* **2010**, 71, S19–S23.
9. Nebbali, R.; Roy, J.; Boulard, T. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renew. Energy* **2012**, 43, 111–129.

10. Kıyan, M.; Bingöl, E.; Melikoğlu, M.; Albostan, A. Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink. *Energy Convers. Manag.* **2013**, *72*, 147–155.
11. Guo, J.; Liu, Y.; Lü, E. Numerical Simulation of Temperature Decrease in Greenhouses with Summer Water-Sprinkling Roof. *Energies* **2019**, *12*, 2435.
12. Linker, R.; Seginer, I. Greenhouse temperature modeling: A comparison between sigmoid neural networks and hybrid models. *Math. Comput. Simul.* **2004**, *65*, 19–29.
13. Coelho, J.P.; Oliveira, P.D.M.; Boaventura-Cunha, J. Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm. *Comput. Electron. Agric.* **2005**, *49*, 330–344.
14. Fourati, F.; Chtourou, M. A greenhouse control with feed-forward and recurrent neural networks. *Simul. Model. Pract. Theory* **2007**, *15*, 1016–1028.
15. Patil, S.; Tantau, H.; Salokhe, V. Modelling of tropical greenhouse temperature by auto regressive and neural network models. *Biosyst. Eng.* **2008**, *99*, 423–431.
16. Azaza, M.; Echaieb, K.; Tadeo, F.; Fabrizio, E.; Iqbal, A.; Mami, A. Fuzzy Decoupling Control of Greenhouse Climate. *Arab. J. Sci. Eng.* **2015**, *40*, 2805–2812.
17. Arbel, A.; Barak, M.; Shklyar, A. Combination of Forced Ventilation and Fogging Systems for Cooling Greenhouses. *Biosyst. Eng.* **2003**, *84*, 45–55.
18. Dayan, J.; Dayan, E.; Strassberg, Y.; Presnov, E. Simulation and control of ventilation rates in greenhouses. *Math. Comput. Simul.* **2004**, *65*, 3–17.

19. Bartzanas, T.; Tchamitchian, M.; Kittas, C. Influence of the Heating Method on Greenhouse Microclimate and Energy Consumption. *Biosyst. Eng.* **2005**, *91*, 487–499.
20. Abdel-Ghany, A.M.; Kozai, T. Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renew. Energy* **2006**, *31*, 1521–1539.
21. Daskalov, P.; Arvanitis, K.; Pasgianos, G.; Sigrimis, N.; Arvanitis, K. Non-linear Adaptive Temperature and Humidity Control in Animal Buildings. *Biosyst. Eng.* **2006**, *93*, 1–24.
22. Abbes, M.; Farhat, A.; Mami, A.; Dauphin-Tanguy, G. Pseudo bond graph model of coupled heat and mass transfers in a plastic tunnel greenhouse. *Simul. Model. Pract. Theory* **2010**, *18*, 1327–1341.
23. Olofsson, T.; Mahlia, T. Modeling and simulation of the energy use in an occupied residential building in cold climate. *Appl. Energy* **2012**, *91*, 432–438.
24. Sdringola, P.; Proietti, S.; Desideri, U.; Giombini, G. Thermo-fluid dynamic modeling and simulation of a bioclimatic solar greenhouse with self-cleaning and photovoltaic glasses. *Energy Build.* **2014**, *68*, 183–195.
25. Lü, X.; Lu, T.; Kibert, C.; Vahtikari, K.; Hughes, M.; Zhao, Y. A dynamic modelling approach for simulating climate change impact on energy and hygrothermal performances of wood buildings. *Build. Simul.* **2018**, *11*, 497–506.
26. Blasco, X.; Martínez, M.; Herrero, J.; Ramos, C.; Sanchis, J. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Comput. Electron. Agric.* **2007**, *55*, 49–70.

27. Ata, M. Effect of hydroponic barley fodder on awassi lambs performance. *J. Biol. Agric. Healthc.* **2016**, 6, 60-64.
28. Gebremedhin, W.K. Nutritional benefit and economic value of feeding hydroponically grown maize and barley fodder for Konkan Kanyal goats. *J. Agric. Vet. Sci.* **2015**, 8, 24-30.
29. Naik, P.; Dhuri, R.; Karunakaran, M.; Swain, B.; Singh, N. Effect of feeding hydroponics maize fodder on digestibility of nutrients and milk production in lactating cows. *Indian J. Anim. Sci.* **2014**, 84, 880-883.
30. Iga, J. Climate characterization and calculation of thermal solar energy for a greenhouse in Aramberri, Nuevo leon, Mexico. *Afric. J. Agric. Res.* **2013**, 8, 3653-3661.
31. Fotsing, C.; Njomo, D.; Cornet, C.; Dubuisson, P.; Nsouandele, J. Acquisition and study of global solar radiation in Maroua-Cameroon. *Int. J. Rene. Ener. Res.* **2015**, 5, 910-918.
32. Bozchalui, M.; Cañizares, C.; Bhattacharya, K. Optimal energy management of greenhouses in smart grids. *IEEE Trans. Smart Grid* **2015**, 6, 827–835.
33. Joudi, K.A.; Farhan, A.A. A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse. *Energy Convers. Manag.* **2015**, 91, 76–82.
34. Fitz-Rodríguez, E.; Kubota, C.; Giacomelli, G.A.; Tignor, M.E.; Wilson, S.B.; McMahon, M. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Comput. Electron. Agric.* **2010**, 70, 105–116.

35. Shen, Y.; Wei, R.; Xu, L. Energy Consumption Prediction of a Greenhouse and Optimization of Daily Average Temperature. *Energies* **2018**, *11*, 65.
36. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56; FAO: Rome, Italy, 1998.
37. Hargreaves, G.H.; Samani, Z.A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Appl. Eng. Agric.* **1985**, *1*, 96–99.
38. Thom, A.; Oliver, H. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **1977**, *103*, 345–357.
39. Jolliet, O. HORTITRANS, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* **1994**, *57*, 23–37.
40. Cengel, Y. Steady heat conduction. In *Heat and Mass Transfer a Practical Approach*, 3rd ed.; McGraw Hill: Boston, MA, USA, 2006; pp. 127–185.
41. Sarafraz, M.; Nikkhah, V.; Madani, S.; Jafarian, M.; Hormozi, F. Low-frequency vibration for fouling mitigation and intensification of thermal performance of a plate heat exchanger working with CuO/water nanofluid. *Appl. Therm. Eng.* **2017**, *121*, 388–399.
42. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. Heat, air and moisture control in building assemblies. In *ASHRAE Handbook—Fundamentals*; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2017.
43. Tong, G.; Christopher, D.; Li, B. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse. *Comput. Electron. Agric.* **2009**, *68*, 129–139.

44. Castañeda-Miranda, R.; Ventura-Ramos, E.; del Rocío Peniche-Vera, R.; Herrera-Ruiz, G. Fuzzy greenhouse climate control system based on a field programmable gate array. *Biosyst. Eng.* **2006**, *94*, 165–177.
45. Garzoli, K.V. A simple greenhouse climate model. *Acta Hortic.* **1985**, *174*, 393–400.
46. Al Ajmi, A.; Salih, A.; Kadim, I.; Othman, Y. Yield and water use efficiency of barley fodder produced under hydroponic system in GCC countries using tertiary treated sewage effluents. *J. Phytol.* **2009**, *1*, 342–348.
47. Al-Karaki, G. Utilization of treated sewage wastewater for green forage production in a hydroponic system. *Emir. J. Food Agric.* **2011**, *23*, 80.
48. Al-Karaki, G.; Al-Hashimi, M. Green fodder production and water use efficiency of some forage crops under hydroponic conditions. *ISRN Agron.* **2011**, *2012*, 924672.
49. Fazaeli, H.; Golmohammadi, H.; Tabatabayee, S.; Asghari-Tabrizi, M. Productivity and nutritive value of barley green fodder yield in hydroponic system. *World Appl. Sci. J.* **2012**, *16*, 531–539.
50. Cengel, Y.; Boles, M. Gas-vapor mixtures and air-conditioning. In *Thermodynamics and Engineering Approach*, 8th ed.; McGraw Hill: New York, NY, USA, 2015; pp. 725–729.