



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

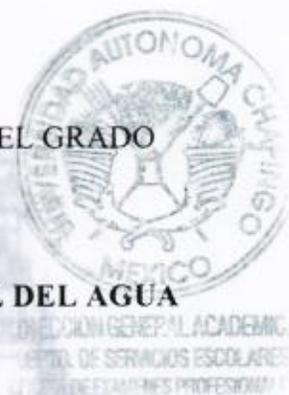
**CONSTRUCCIÓN, EVALUACIÓN Y MODELACIÓN
MATEMÁTICA DE UN SECADOR SOLAR TIPO
INVERNADERO**

**TESIS QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE:**

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA

ANGEL GARDUÑO GARCÍA



CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2017.

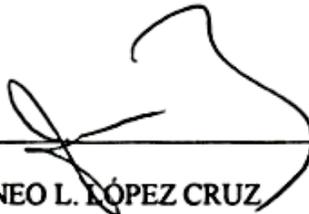


CONSTRUCCIÓN, EVALUACIÓN Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UN
SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

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

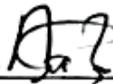
DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR



DR. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ

ASESOR



DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

ASESOR



DR. EUGENIO ROMANTCHIK KRIUCHKOVA

LECTOR EXTERNO:



DR. CUAUHTÉMOC PÉREZ VEGA

AGRADECIMIENTOS

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

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

Al programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la UACH, por permitirme ser parte de su proyecto educativo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo de beca para la realización de mis estudios de doctorado.

Al Dr. Irineo L. López Cruz, ya que, gracias a su gran disposición, acertada dirección, consejo y sugerencias hizo posible la culminación de este trabajo.

Al Dr. Agustín Ruiz García por su enorme ayuda, quién siempre tuvo la disposición de atender asuntos relacionados con el presente trabajo.

Al Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova por sus valiosas observaciones realizadas al presente trabajo.

Al Dr. Cuauhtémoc Pérez Vega por su invaluable contribución para mejorar la versión final de la tesis.

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

DEDICATORIA

A mi amada familia

Yanet y “Javi”

A mi querida madre

María de las Mercedes García Anzaldo

A mi tutor

Margarito López Arroyo

A mis hermanos

Marco Antonio, Martín y Margarita

A todos mis amigos con los cuales he convivido durante mi estancia en Chapingo, principalmente a Carlos, Francisco, “Roger”, “Gabo”, “Adán”, Josué, “Marín”, “Don Villa”, Ricardo, “Orbelín”, Juan y “Lalo”.

Y a todos aquellos amigos que no he señalado, pero no por eso son menos importantes.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

Angel Garduño García nace en Toluca Estado de México un 14 de abril de 1988, realizó sus estudios de primaria en la escuela Miguel Hidalgo en el municipio de Papalotla Estado de México. Cursó sus estudios de secundaria en la escuela Moisés Sáenz en el mismo municipio. En el año 2003 aprueba el examen de ingreso a la Universidad Autónoma Chapingo donde culmina exitosamente sus estudios de nivel medio superior, para después ingresar a la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola en la misma Universidad, egresando en el 2010, mismo año donde obtuvo la titulación por mérito académico.

En el 2010 se postula para ingresar al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua, donde es aceptado y decide trabajar en el área de biosistemas mediante la investigación de simulación del proceso de fermentación de cerveza artesanal. Culminando de manera exitosa su investigación en el 2012.

En el 2013 inició sus estudios de nivel doctorado en el programa Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua, donde es aceptado y comenzó a trabajar en el área de biosistemas mediante la investigación Construcción, evaluación y modelación matemática de un secador solar tipo invernadero.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xiii
RESUMEN.....	14
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Objetivo General.....	3
1.2 Objetivos Particulares	3
1.3 Estructura de la tesis.....	4
1.4 Estado del problema	4
1.4 Literatura citada	5
CAPÍTULO 2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE SECADORES SOLARES TIPO INVERNADERO CON CONVECCIÓN NATURAL Y FORZADA PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS: ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Resumen.....	7
2.2 Introducción	8
2.3 Clasificación de los secadores solares	11
2.4 Secadores solares tipo invernadero	12
2.5 Modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección natural	13
2.6 Modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección forzada	17
2.7 Modelación de secadores solares tipo invernadero con convección natural y forzada	22
2.8 Análisis crítico	23
2.9 Conclusiones.....	26
2.10 Literatura citada	27
CAPÍTULO 3. CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO PARA DESHIDRATAR PRODUCTOS AGRÍCOLAS... 33	
3.1 RESUMEN.....	33
3.2 INTRODUCCIÓN.....	34

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
3.3.1 Construcción del Sistema Secador Solar Tipo Invernadero (SSSTI)	35
3.3.2 Evaluación del SSSTI.....	38
3.3.2.1 Mediciones y sistema de registro de datos	38
3.3.2.3 Evaluación del SSSTI con producto (Stevia)	40
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
3.4.1 Comportamiento del SSSTI sin producto	42
3.4.2 Comportamiento del SSSTI en el deshidratado de <i>Stevia</i>	43
3.4.3 Tiempo y costos de construcción	50
3.5 CONCLUSIONES.....	51
3.6 LITERATURA CITADA	52
CAPÍTULO 4. COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO DURANTE EL DESHIDRATADO DE JITOMATE.....	54
4.1 RESUMEN.....	54
4.2 Introducción	55
4.3 Materiales y métodos.....	56
4.3.1 Descripción del secador solar	56
4.3.2 Experimentos de secado.....	57
4.3.4 Mediciones y sistema de registro de datos	60
4.4 Resultados y discusión	61
4.5 Conclusiones.....	72
4.5 Literatura citada	73
CAPÍTULO 5. MODELACIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA MEDIANTE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) EN UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO	76
5.1 Resumen.....	76
5.2 Introducción.....	77
5.3 Materiales y métodos.....	79
5.3.1 Descripción del secador solar	79
5.3.2 Modelación de la temperatura y flujo de aire	80

5.3.3 Modelo de turbulencia	81
5.3.4 Modelo de radiación solar	82
5.3.4 Mediciones y sistema de registro de datos	83
5.3.5 Construcción del modelo tridimensional de Dinámica de Fluidos Computacional (3D-CFD)	84
5.4 Resultados y Discusión	87
5.5 Conclusiones	90
5.6 Literatura citada	91
6. CONCLUSIONES GENERALES Y DISCUSIÓN.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 1. Clasificación de secadores solares para productos agrícolas. (Adaptado de Fudholi *et al.*, 2010). 11
- Figura 2. Procesos físicos de radiación, convección y conducción que ocurren en un secador solar tipo invernadero (Adaptado de Sahdev, 2014). 13

CAPÍTULO 3

- Figura 1. Estructura en acero galvanizado del sistema secador solar tipo invernadero construido en Chapingo, México. 37
- Figura 2. Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica y cubierta de policarbonato construido en Chapingo, México. 38
- Figura 3. Distribución de puntos de medición para las variables temperatura del aire a la altura de las mesas (T), temperatura del aire 0.9 m arriba de las mesas (T_a), temperatura a la salida del secador (T_o), temperatura de la cubierta (T_c), temperatura del suelo (T_s), temperatura del producto (T_p), humedad relativa del aire interior (RH), masa del producto (M), radiación solar global (R_g), temperatura ambiental (T_{amb}), humedad relativa del aire en el ambiente (RH_{amb}). 39
- Figura 4. Deshidratado de *Stevia* en el sistema secador solar tipo invernadero construido en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 41
- Figura 5. Radiación solar global (R_g) y temperatura en el interior (T) y exterior (T_{amb}) del SSSTI (a) Experimento uno: con extractores en funcionamiento; (b) Experimento dos: con extractores apagados. 43
- Figura 6. Radiación solar global y temperaturas en el interior y exterior del sistema secador solar tipo invernadero durante el deshidratado de

<i>Stevia</i> , (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C). (T : Temperatura del aire a la altura de las mesas; T_a : Temperatura del aire 0.9 m arriba de las mesas; T_{amb} : Temperatura del ambiente; T_o : Temperatura del aire a la salida del secador; R_g : radiación solar).	45
Figura 7. Temperatura del aire dentro del sistema secador solar tipo invernadero a la altura de las mesas durante el deshidratado de <i>Stevia</i> en los cuatro puntos mostrados en la Figura (3), (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C).	46
Figura 8. Temperaturas de la cubierta (T_c), suelo (T_s) y producto (T_p) durante el deshidratado de <i>Stevia</i> del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C).	47
Figura 9. Humedad relativa en el interior (RH_{in}) y exterior (RH_{amb}) del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C).....	48
Figura 10. Curvas de secado de <i>Stevia</i> en el sistema secador solar tipo invernadero, (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C).	49
Figura 11. Calidad visual de deshidratado de <i>Stevia</i> . (a) En invernadero con cubierta de plástico y ventilación natural durante época de lluvia (De la Torre, S. 2016); (b) En el sistema secador solar tipo invernadero construido en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.	50
CAPÍTULO 4	
Figura 1. Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica y cubierta de policarbonato ubicado en Chapingo, México.	57

Figura 2. Deshidratado de jitomate en el sistema secador solar tipo invernadero ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.	58
Figura 3. Distribución de puntos de medición para las variables temperatura del aire a la altura de las mesas (T), temperatura del aire 0.9 m arriba de las mesas (T_a), temperatura a la salida del secador (T_o), temperatura de la cubierta (T_c), temperatura del suelo (T_s), temperatura del producto (T_p), humedad relativa del aire interior (RH), masa del producto (M), radiación solar global (R_g), temperatura ambiental (T_{amb}), humedad relativa del aire en el ambiente (RH_{amb}).	61
Figura 4. Radiación solar global y temperaturas en el interior y exterior del sistema secador solar tipo invernadero durante el deshidratado de jitomate, (a) Experimento uno; (b) experimento dos, día uno; (c) experimento dos, días dos. (T : Temperatura del aire a la altura de las mesas; T_a : Temperatura del aire 0.9 m arriba de las mesas; T_{amb} : Temperatura del ambiente; T_o : Temperatura del aire a la salida del secador; R_g : radiación solar).	62
Figura 5. Temperaturas de la cubierta (T_c), suelo (T_s) y producto (T_p) durante el deshidratado de jitomate del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento uno; (b) experimento dos, día uno; (c) experimento dos, días dos.	65
Figura 6. Humedad relativa en el interior (RH_{in}) y exterior (RH_{amb}) del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento uno; (b) experimento dos, día uno; (c) experimento dos, días dos.	66
Figura 7. Curvas de secado de jitomate en el sistema secador solar tipo invernadero, (a) Experimento uno; (b) experimento dos, día uno; (c) experimento dos, días dos.	68

Figura 8. (a) Variaciones de las razones de humedad experimentales y las predichas mediante el modelo de Page con respecto al tiempo. (b) Comparación entre las razones de humedad experimentales y las predichas por el modelo de Page.	71
Figura 9. Calidad visual de del jitomate deshidratado en el sistema secador solar tipo invernadero ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.	72
CAPÍTULO 5	
Figura 1. Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica y cubierta de policarbonato ubicado en Chapingo, México.	80
Figura 2. Distribución de puntos de medición para las variables temperatura del aire (T), temperatura de la cubierta (T_c), temperatura del suelo (T_s), radiación solar global (R_g) y temperatura ambiental (T_{amb}).....	83
Figura 3. Espectros métricos de la calidad ortogonal y simetría de la malla (Gok <i>et al.</i> , 2017).	85
Figura 4. Malla del modelo computacional de SSSTI.	85
Figura 5. Distribución espacial de temperatura en el interior del secador solar tipo invernadero predicha por el modelo 3D-CFD.....	88
Figura 6. Distribución espacial de temperatura a la altura de las mesas de secado predicha por el modelo 3D-CFD.....	88
Figura 7. Flujo de aire en el interior del secador solar tipo invernadero predicho por el modelo CFD	90

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 2

Cuadro 1. Trabajos previos sobre modelación matemática en secadores solares tipo invernadero con convección natural.....	16
Cuadro 2. Trabajos previos sobre modelación matemática en secadores solares tipo invernadero con convección forzada.....	20
Cuadro 3. Trabajos desarrollados sobre secadores solares tipo invernadero con convección natural y forzada.....	23

CAPÍTULO 3

Cuadro 1. Costos y tiempo de construcción del secador solar tipo invernadero Chapingo, México.	51
-----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 4

Cuadro 1. Modelos de curva de secado de capa delgada comúnmente utilizados (Sacilik <i>et al.</i> 2006).	59
Cuadro 2. Parámetros estimados y estadísticas de ajuste de los modelos evaluados.	70

CAPÍTULO 5

Cuadro 1. Resumen de las condiciones iniciales y de frontera del modelo CFD.	86
Cuadro 2. Promedio del error absoluto entre los valores de temperatura medidos y los simulados por el modelo CFD.	89

CONSTRUCCIÓN, EVALUACIÓN Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

CONSTRUCTION, EVALUATION AND MATHEMATICAL MODELING OF A GREENHOUSE-TYPE SOLAR DRYER

Angel Garduño-García¹; Irineo L. López-Cruz²

RESUMEN

Las pérdidas de productos agrícolas frescos en México de acuerdo con estudios de FAO son de hasta más de 55%. El secado al sol es un método común para deshidratar productos agrícolas; pero la calidad del producto es muy baja. Los sistemas de secado y deshidratado con energía solar reducen las pérdidas y mejoran la calidad del producto, pero su diseño, optimización y control necesita el desarrollo de modelos matemáticos y experimentos. El objetivo de la presente investigación fue construir, evaluar y modelar matemáticamente un secador solar tipo invernadero de forma parabólica, mediante pruebas realizadas sin producto y bajo condiciones de deshidratación de *Stevia* (*Stevia rebaudiana*) y frutos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.). El estudio se desarrolló en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. Se construyó un sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI), de forma parabólica, con cubierta de policarbonato, piso de concreto, estructura de acero galvanizado y extractores para el control de temperatura. El funcionamiento del SSSTI se evaluó mediante monitoreo de la temperatura y humedad en su interior sin producto, mediante el deshidratado de *Stevia*, donde la temperatura máxima del secador se mantuvo entre 45 y 50 °C, y mediante deshidratado de frutos de jitomate, donde la temperatura se mantuvo en un máximo de 45 °C. Se encontró que el SSSTI puede alcanzar temperaturas máximas de hasta 69 °C sin producto y sin ventilación forzada. El contenido de humedad final de *Stevia* fue entre el 12% y 13% base húmeda, con un tiempo de secado entre 6 y 6.5 h. El contenido de humedad en el caso del jitomate se redujo del 95% al 24% en 7 h en un día soleado. De nueve modelos matemáticos de capa delgada, que se evaluaron en el experimento de jitomate, la ecuación de Page presentó el mejor ajuste a las mediciones. Finalmente, se desarrolló un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) para la temperatura y flujo del SSSTI, el cual fue evaluado contra datos experimentales considerando su variación espacial.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, deshidratado de *Stevia*, deshidratado de jitomate.

¹Autor de tesis, ² Director de tesis.

ABSTRACT

According to FAO studies, fresh agricultural product losses exceed 55% in Mexico. Solar drying is the most common method to dehydrate agricultural products, but product quality is very low. Drying and dehydrating systems with solar energy reduce losses and improve product quality; however, their design, optimization and control require the development of mathematical models and experiments. The objective of this research was to construct, evaluate and mathematically model a parabolic greenhouse-type solar dryer, through tests carried out without product and under *Stevia* (*Stevia rebaudiana*) and tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit dehydrating conditions. The study was conducted at Chapingo Autonomous University, Chapingo, Mexico. A parabolic greenhouse-type solar dryer system (GTSDS) was built with a polycarbonate cover, concrete floor, galvanized steel frame and temperature control fans. The performance of the GTSDS was evaluated by monitoring the inside air temperature and humidity without product, by means of *Stevia* dehydration, where the maximum dryer temperature stayed between 45 and 50 °C, and by tomato fruit dehydration, where the temperature was maintained at a maximum of 45 °C. Main findings were that the GTSDS can reach maximum temperatures of up to 69 °C without product and without forced ventilation. The final moisture content of *Stevia* was between 12% and 13% wet basis (wb), with a drying time of between 6 to 6.5 h. The moisture content in the case of tomato fruits was decreased from 95% to 24% in 7 h under sunny day conditions. From nine thin-layer mathematical models, evaluated in the tomato experiment, the Page equation showed the best fitting to the measurements. Finally, a computational fluid dynamics (CFD) model was developed for the air temperature and airflow inside the GTSDS, which was evaluated against experimental data, taking into consideration its spatial variation.

Keywords: Computational fluid dynamics, *Stevia* dehydration, tomato dehydration.

¹Thesis author, ²Thesis Advisor

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El uso de la energía solar en México para el deshidratado de productos agrícolas ha cobrado importancia debido a que existen productos como frutas y verduras que, si no se comercializan de manera inmediata después de la cosecha, representan grandes pérdidas pues se transforman en desperdicios. De acuerdo con la FAO (2015), México pierde cerca del 37% de sus alimentos, entre los que destacan guayaba (*Psidium guajava* L.) (57%), leche de vaca (57%), mango (*Mangifera indica* L.) (55%), pescados (54%), aguacate (*Persea americana* Mill.) (53%), plátano (*Musa* spp.) (54%), nopal (*Opuntia* spp.) (53%), arroz (*Oryza sativa* L.) (46%) y pepino (*Cucumis sativus* L.) (45%). Una alternativa a este problema es conservar dichos productos mediante su deshidratación para incrementar la vida post-cosecha y prolongar el tiempo en el que pueden ser comercializados (Castañeda-Miranda *et al.*, 2012).

El método más utilizado para conservar productos agrícolas es el deshidratado a la intemperie, sin embargo, este proceso bajo condiciones climáticas hostiles conduce a pérdidas en la cantidad y calidad del producto (Pangavhane *et al.*, 2002). Estas pérdidas están relacionadas con la contaminación por suciedad, polvo e infestación por insectos, roedores y otros animales (Janjai y Bala, 2012; Prakash *et al.*, 2016). Una solución a este problema, es el uso de sistemas de secado solar con control del clima, lo cual puede reducir las pérdidas de cosechas y mejorar la calidad de productos deshidratados en comparación con métodos tradicionales (Yaldiz *et al.*, 2001). Uno de los sistemas de secado solar que destaca debido por su capacidad de procesamiento de producto, es el secador solar tipo invernadero (Janjai *et al.*, 2009).

Existen avances importantes en el diseño, construcción y uso de secadores solares tipo invernadero en Alemania, India, China y Tailandia, pero la adopción en México de estas tecnologías se dificulta por las diferencias en cuanto al clima y las características de los productos a secar entre estos países y México. Además, hay pocos estudios acerca del diseño, construcción, materiales y costo

de un secador de este tipo (Fuentes-Salinas *et al.*, 2003; Hossain *et al.*, 2005), lo que dificulta la adopción de esta tecnología.

El funcionamiento de los secadores solares está basado en el principio invernadero, donde la energía solar es capturada mediante colectores que elevan la temperatura del fluido (aire), el cual realiza el proceso de secado, por lo que, la eficiencia de un sistema de secado habitualmente se expresa a través de diferentes parámetros tales como: eficiencia del secador, eficiencia del captador solar, tasa de extracción de humedad específica y capacidad evaporativa (Olguin y Durán, 2017). Debido a lo anterior, todo sistema de secado solar debe ser diseñado en forma apropiada para satisfacer los requerimientos de un producto específico, condiciones climáticas del lugar y presentar su desempeño óptimo en cuanto a tiempos de secado y calidad final del producto. Esto significa que la configuración (dimensiones, materiales de cubierta y estructurales, microclima) del secador depende de factores ambientales y económicos. Pero los experimentos a gran escala con diferentes productos, estaciones del año, configuraciones del sistema pueden resultar muy costosos e imprácticos (Bala y Woods, 1994). Por esto, el desarrollo de modelos matemáticos (estáticos, dinámicos y espaciales) y simulación por computadora son una herramienta básica para predecir el comportamiento de un sistema de secado solar. El desarrollo de modelos matemáticos de los secadores solares es necesario para poder incrementar el conocimiento de los procesos físicos asociados con la deshidratación. Pero también para controlar, diseñar y optimizar este sistema. Además de contribuir en el diseño de secadores, los modelos matemáticos son importantes en la operación del sistema, la calidad del producto a secar y el ahorro de energía (Prakash *et al.*, 2016).

En general, los enfoques para modelar matemáticamente el sistema secador solar son: modelos mecanicistas, modelos empíricos, modelos de caja negra y modelos numéricos o de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). De acuerdo con Bala y Janjai (2013), el futuro de las investigaciones referentes a secador solares está encaminado al estudio de la optimización de la

calidad del producto y la optimización de los parámetros de diseño de los secadores mediante el uso de técnicas como el análisis de fluidos computacional. Los modelos matemáticos que permiten estudiar el comportamiento espacial de un secador solar tipo invernadero representado por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales y que utilizan soluciones numéricas basadas en CFD, solo se han aplicado de manera incipiente en secadores solares tipo invernadero. Por lo tanto, existe un gran potencial en el desarrollo de investigaciones como una herramienta muy importante que puede contribuir a la generación un diseño de secador solar, cuya distribución de las variables climáticas en el interior sea la más adecuada para el secado de diferentes productos agrícolas (Garduño *et al.*, 2017).

El objetivo de la presente investigación fue construir, evaluar y modelar matemáticamente un secador solar tipo invernadero de forma parabólica

1.1 Objetivo General

- Construir, evaluar y modelar matemáticamente un secador solar tipo invernadero de forma parabólica.

1.2 Objetivos Particulares

- Realizar una revisión del estado del sobre los diferentes enfoques de modelación matemática aplicados al incremento del conocimiento del sistema secador solar tipo invernadero para deshidratado de productos agrícolas.
- Desarrollar una metodología de construcción de un secador solar tipo invernadero.
- Construir y evaluar el comportamiento del secador mediante pruebas en condiciones de no-carga y durante el secado de *Stevia* y jitomate.
- Generar y evaluar un modelo mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de un secador solar tipo invernadero en condiciones de no-carga.

1.3 Estructura de la tesis

El trabajo se divide en cuatro etapas. En la primera de ellas (capítulo 2) se realizó una revisión del estado del arte sobre modelación matemática de secadores solares tipo invernadero, tanto de convección natural como forzada. En la segunda (capítulo 3), se construyó y evaluó el secador mediante pruebas en condiciones de no-carga y de deshidratado de Stevia. En la tercera etapa (capítulo 4), se realizaron pruebas de secado de jitomate, donde los datos obtenidos fueron utilizados para el ajuste de modelos de capa delgada. Y, en la última fase (capítulo 5) se desarrolló un modelo CFD del secador solar en condiciones de no-carga, el cual fue evaluado con datos experimentales.

1.4 Estado del problema

Uno de los retos más importantes de la sociedad para el próximo medio siglo es encontrar las fuentes para satisfacer la creciente demanda mundial de energía. En la actualidad, se utilizan aproximadamente 4.1×10^{20} J/año (equivalente a un consumo continuo de potencia de 13 TW) de energía para satisfacer las necesidades de consumo humano, la cual es abastecida principalmente a partir de reservas fósiles. Con esto, se hace evidente la necesidad de hacer uso de las fuentes de energía alternas, de entre la cuales, la principal fuente de energía limpia a la que se tiene acceso es el sol, ya que éste genera 120 000 TW de radiación sobre la superficie de la Tierra, cantidad muy por encima de las necesidades humanas (Nault, 2005). La radiación solar se distribuye de manera desigual en todo el mundo. Ésta varía en intensidad desde una ubicación geográfica a otra dependiendo de la latitud, estación, y hora del día. El territorio total de México se encuentra entre las latitudes 14° y 33° N y las longitudes 86° y 119° W, por lo que es uno de los pocos países que están 100% dentro del cinturón solar. De esta manera, la radiación diaria en el país oscila entre los 4.4 y 6.3 kWhm⁻², lo cual ayuda a que la implementación de tecnologías que funcionan a base de energía solar sea altamente factible (Romero *et al.*, 2012).

Recientemente, el aprovechamiento de la energía solar en México para el deshidratado de productos agrícolas ha cobrado mayor importancia debido a las

ventajas que esto trae consigo. Entre los sistemas de secado solar que destacan debido a su capacidad de procesamiento de producto, se encuentra el secador solar tipo invernadero (Janjai *et al.*, 2009). Su uso se encuentra difundido principalmente en países como Alemania, India, China y Tailandia, donde además han generado avances importantes en cuanto a la construcción y diseño de los mismos. Sin embargo, la adopción en México de estas tecnologías se dificulta en cierta medida por las diferencias existentes en cuanto al clima y las características de los productos a secar entre estos países y México. Por esto se necesita generar conocimiento científico adecuado a las condiciones de nuestro país, en el cual basar el desarrollo de tecnología de secadores solares propia especialmente en cuanto a su diseño, optimización y control, que tome en cuenta las demandas de los productos específicos en el mercado nacional.

De acuerdo con Voskens y Zegers (2005), el diseño óptimo de un sistema secador solar depende el tipo de producto, la región y el nivel al cual se debe secar el producto (granja o empresa). Esto requiere i) estudios detallados para cada producto y sitio para determinar la factibilidad económica y de mercado del sistema de secado solar. ii) Desarrollar y ejecutar una estrategia de mercado para cada segmento de mercado. iii) Diseminar información para acelerar la adopción de sistemas comerciales de secado solar. iv) Diseñar secadores solares con base en la experiencia práctica y condiciones climáticas y económicas locales. v) Se requiere de proyectos demostrativos para cada cultivo, región y grupo de usuarios, y vi) Entrenamiento de usuarios locales y contratistas constructores como un componente clave de la adopción y aceptación del secado solar.

1.4 Literatura citada

Bala, B. K., and Woods, J. L. (1994). Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy*, 53(3): 259-266.

Castañeda-Miranda. A., A. González-Parada., R. Guzmán-Cabrera, C., O. G. Ibarra-Manzano. 2012. Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. *Acta Univ.* 22: 14-19.

FAO. 2015. Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. Boletín 2. 31 pp. <http://www.fao.org/3/I4655S.pdf>. (Consulta: Noviembre 2017).

Fuentes-Salinas, M., D. Luna-Sánchez, J. Osorio-Suárez, y J. Corona-Islas. 2003. Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. *Rev. Chapingo Ser. Cie.* 9: 171-176.

Garduño-García, A., López-Cruz, I. L., & Ruiz-García, A. 2017. Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural and forced convection for agricultural products: state of the art. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas.* 9(1), 19-36.

Hossain, M. A., J. L. Woods, and B. K. Bala. 2005. Optimisation of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss. *Renew. Energy.* 30: 729-742.

Janjai, S., N. Lamler, P. Intawee, B. Mahayothee, B. K. Bala, M. Nagle, and J. Müller. 2009. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy.* 83: 1550-1565.

Janjai, S., and B. K. Bala. 2012. Solar drying technology. *Food Eng. Rev.* 4: 16-54.

Kumar, A., O. Prakash, A. Kaviti, and A. Tomar. 2013. Experimental analysis of greenhouse dryer in no-load conditions. *J. Environ. Res. Dev.* 7:1399–1406.

Nault, R.M. 2005. Basic Research Needs for Solar Energy Utilization. *Office of Science.* US Department of Energy.

Olguin, J. Q. y Durán, R. R. (2017). Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero. *REMEXCA.* 8(2): 321-331.

Pangavhane, D. R., R. L. Sawhney, and P. N. Sarsavadia. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy.* 27: 579-590.

Prakash, O., V. Laguri, A. Pandey, A. Kumar, and A. Kumar. 2016. Review on various modelling techniques for the solar dryers. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 62: 396-417.

Romero-Hernandez, S., Rodríguez-Granada, B.D., Romero-Hernandez, O., Wood, D. 2012. Solar Energy Potential in Mexico's northern border states. *Woodrow Wilson International Center for Scholars.* 30 pp.

Voskens, R., & Zegers, F. (2005). Solar drying in Europe. *ECOFYS. IEA task,* 29.

Yaldiz, O., C. Ertekin, and H. I. Uzun. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy.* 26: 457-465.

CAPÍTULO 2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE SECADORES SOLARES TIPO INVERNADERO CON CONVECCIÓN NATURAL Y FORZADA PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS: ESTADO DEL ARTE¹

Mathematical modeling of greenhouse type solar dryers with natural and forced convection: state of the art

Angel Garduño-García¹; Irineo L. López-Cruz¹; Agustín Ruíz-García^{1*}

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México,
C. P. 56230, México.

Correo-e: aruiz@correo.chapingo.mx, tel.: 01 595 952 1500 ext. 1551 (*Autor de correspondencia)

2.1 Resumen

El secado al sol abierto es el método más comúnmente utilizado para preservar productos agrícolas, sin embargo, este tipo de secado bajo condiciones climáticas hostiles conduce a graves pérdidas en la cantidad y calidad del producto. El uso de tecnología de secadores solares en países en desarrollo, puede reducir las pérdidas de las cosechas y mejorar significativamente la calidad del producto en comparación con métodos tradicionales. El desarrollo de modelos matemáticos de secadores solares es necesario para poder diseñar, controlar y optimizar este tipo de sistemas. El presente trabajo muestra los avances recientes en los diferentes enfoques que se han aplicado para modelar y simular secadores solares tipo invernadero tanto de convección natural como forzada. Además, se discuten los enfoques de modelación que no han sido usados de manera significativa en esta área tales como los modelos empíricos y numéricos.

¹ Publicado en la Revista Ingeniería Agrícola y Biosistemas,

Highlights:

- a) The review paper shows that mathematical models of greenhouse solar dryers based on physical principles arise from unsteady-state mass and energy balances
- b) The review paper shows that the development of mathematical models of greenhouse solar dryers researchers have not applied the general procedure for modeling of dynamical systems
- c) The review paper shows that the approach of Computational Fluid Dynamics has not been applied to study the greenhouse-type solar dryers
- d) The review paper shows only few studies have applied black-box models such as artificial neural networks, fuzzy logic systems and autoregressive models to greenhouse-type solar dryers.

Palabras clave: Deshidratador solar, modelos teóricos, modelos empíricos, dinámica de fluidos computacional, modelos neuro-difusos.

Additional keywords: Solar dehydrator, theoretical models, empirical models, computational fluids dynamics, neuro-fuzzy models.

2.2 Introducción

El secado se define como un proceso de eliminación de humedad debido a la transferencia de calor y masa en forma simultánea (Janjai & Bala 2012; El-Sebaili & Shalaby, 2012). Este proceso es un método clásico para la conservación de alimentos, el cual reduce el peso del producto para facilitar su transporte y disminuye su tamaño para hacer más eficiente su almacenamiento (Ertekin & Yaldiz, 2004). El proceso de secado se divide en dos etapas. La primera etapa ocurre en la superficie del material a una velocidad de secado constante y es similar a la evaporación de agua en el ambiente. La segunda etapa se lleva a cabo con una velocidad de secado decreciente. La condición de la segunda etapa es determinada por las propiedades del material que se está secando (Can, 2000; El-Sebaili & Shalaby, 2012).

El secado al sol abierto es el método más antiguo utilizado para preservar productos agrícolas como granos, frutas y verduras (Belessiotis & Delyannis, 2011). Sin embargo, este tipo de secado bajo condiciones climáticas hostiles conduce a graves pérdidas en la cantidad y calidad del producto (Pangavhane, Sawheny, & Sarsavadia, 2002). Estas pérdidas están relacionadas con la contaminación por suciedad, el polvo y la infestación por insectos, roedores y otros animales (Janjai & Bala 2012; Prakash, Laguri, Pandey, Kumar, & Kumar, 2016). Por lo tanto, la introducción de tecnología de secadores solares en países en desarrollo, puede reducir las pérdidas de cosechas y mejorar significativamente la calidad del producto en comparación con métodos tradicionales, tales como el secado en sombra o a sol abierto (Yaldiz, Ertekin, & Uzun, 2001).

Uno de los sistemas de secado solar con mayor potencial, ya que puede ser usado a escala industrial, debido a su capacidad de procesamiento de producto, es el secador solar tipo invernadero, cuya estructura es normalmente de barras de hierro galvanizadas y la cubierta y paredes son de policarbonato. La pared frontal tiene entradas de aire. Los productos se ubican en una capa fina sobre varias bandejas localizadas sobre plataformas elevadas de un solo nivel para facilitar la carga y descarga. La radiación solar al pasar por la cubierta calienta el aire, los productos y el piso de concreto. El aire ingresa al secador y es calentado al pasar a través de y sobre el producto absorbiendo su humedad. El aire húmedo normalmente es removido del secador mediante extractores. Un diseño especial de secador solar tipo invernadero es aquel que tiene una forma parabólica y es ventilado con extractores alimentados por un sistema fotovoltaico de energía solar (Janjai *et al.*, 2009).

Bala (1997) fue uno de los pioneros en estudiar los fundamentos de transferencia de calor y masa que ocurren en el proceso de secado dentro de un secador solar tipo invernadero. Posteriormente, otros investigadores han reportado resultados relacionados con transferencia de calor y masa durante el secado con la implementación de un secador solar tipo invernadero en forma de túnel (Hossain,

Woods, & Bala, 2005). Recientemente, se han propuesto modelos matemáticos de versiones mejoradas de secadores solares tipo invernadero (Janjai *et al.*, 2009) y secadores solares que utilizan energía solar fotovoltaica para controlar eficientemente la ventilación (Barnwal & Tieari, 2008; Janjai *et al.*, 2009).

Todo sistema de secado solar debe ser diseñado en forma apropiada para satisfacer los requerimientos de un producto específico y presentar su desempeño óptimo en cuanto a tiempos de secado y calidad final del producto. Esto significa que la configuración (dimensiones, materiales de cubierta y estructurales, microclima) del secador depende de factores ambientales y económicos. Pero los experimentos a gran escala con diferentes productos, estaciones del año, configuraciones del sistema pueden resultar muy costosos e imprácticos (Bala & Woods, 1994). Por esto, el desarrollo de modelos matemáticos (estáticos y dinámicos) y simulación por computadora es una herramienta básica para predecir el comportamiento de un sistema de secado solar. El desarrollo de modelos matemáticos de los secadores solares es necesario para poder incrementar el conocimiento de los procesos físicos asociados con la deshidratación. Pero también para controlar, diseñar y optimizar este sistema. Además de contribuir en el diseño de secadores, los modelos matemáticos son importantes en la operación del sistema, la calidad del producto a secar y el ahorro de energía (Prakash *et al.*, 2016). En un artículo de revisión reciente (Chauhan, Kumar, A., & Gupta, 2016) sobre modelos térmicos de secadores solares tipo invernadero, se enfatiza la importancia del uso de este tipo de modelos mecanicistas en el diseño y control de estos sistemas.

Un modelo matemático es una representación simplificada de un sistema. En general, se han aplicado tres enfoques para modelar matemáticamente el sistema secador solar: modelos mecanicistas, modelos empíricos y modelos numéricos o de dinámica de fluidos computacional (CFD). De acuerdo con Bala y Janjai (2013), el futuro de las investigaciones referentes a secador solares está encaminado al estudio de la optimización de la calidad del producto y la optimización de los parámetros de diseño de los secadores mediante el uso de técnicas como el análisis de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés).

El propósito de este trabajo es presentar una revisión sobre los diferentes enfoques de modelación matemática aplicados al incremento del conocimiento del sistema secador solar tipo invernadero para deshidratado de productos agrícolas. Además, mostrar los enfoques de modelación usados hasta ahora para diseñar, optimizar y controlar el ambiente de este sistema. El problema se aborda tomando en cuenta la clasificación más general de los secadores solares tipo invernadero, la cual los incluye dentro de las categorías de secadores solares de convección natural (pasivos) y forzada (activos).

2.3 Clasificación de los secadores solares

Una forma de para clasificar los secadores solares de manera general es de acuerdo al mecanismo por el cual la energía, que es utilizada para eliminar la humedad, se transfiere al producto (Prakash & Kumar, 2013; Prakash & Kumar, 2014c). Así, se pueden identificar tres tipos: (1) secador solar directo, (2) secador solar indirecto y (3) secador solar de tipo mixto. Otra clasificación de secadores solares para productos agrícolas más precisa, es presentada por Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman (2010), donde se toma en cuenta el diseño de los componentes del sistema y la forma en la que se utiliza la energía solar (Figura 1).

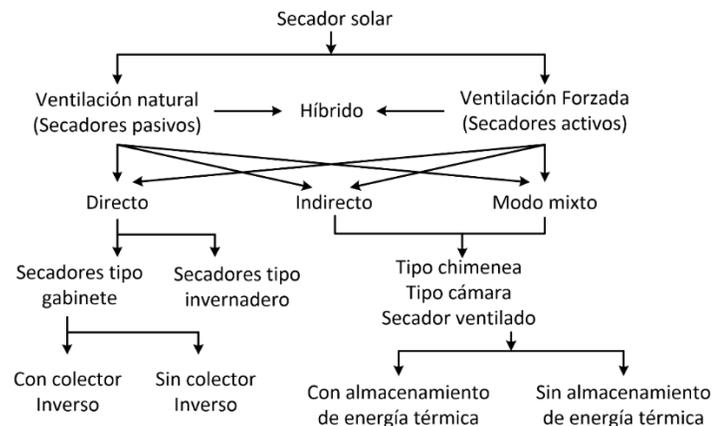


Figura 1. Clasificación de secadores solares para productos agrícolas. (Adaptado de Fudholi *et al.*, 2010).

2.4 Secadores solares tipo invernadero

VijayaVenkataRaman, Iniyar, y Goic (2012) definen el sistema de secado solar tipo invernadero como un colector solar grande en el cual tiene lugar el proceso deshidratado de un producto (agrícola, marino o pecuario). De acuerdo con Prakash y Kumar (2014c), los secadores solares tipo invernadero son incluidos normalmente dentro de la categoría de directos o mixtos (dando por hecho que en ambas categorías existe un recinto con cubierta transparente, es decir, existe absorción de radiación solar sobre el producto). Asimismo, Kumar, Tiwari, Kumar, y Pandey (2006) afirman que una subclasificación de éstos puede dividirse en dos clases de acuerdo a su estructura: (1) forma de domo, cuyo objetivo es aprovechar al máximo la radiación solar global y (2) de techo plano, el cual promueve una mezcla adecuada del aire dentro del secador.

Una clasificación más general de este tipo de secadores incluye sólo dos categorías (1) secador solar tipo invernadero pasivo (convección natural), (2) secador solar tipo invernadero activo (convección forzada), (Bala & Debnath, 2012; Prakash & Kumar, 2013, Prakash & Kumar, 2014c). En los secadores solares de convección natural el flujo de aire es establecido mediante las fuerzas de flotación del fluido generadas a partir de la diferencia de temperatura en distintos puntos del fluido. En los secadores solares de convección forzada el flujo de aire es proporcionado mediante un ventilador operado por electricidad o combustible fósil.

En la Figura 2 se ilustra el principio de funcionamiento de un secador solar tipo invernadero, en el cual el producto a secar es colocado en una capa recibiendo radiación solar que se transmite a través de una cubierta transparente, mientras que la humedad es removida del sistema mediante convección natural o forzada (Sahdev, 2014). Durante el proceso, una fracción de la radiación solar incidente sobre la cubierta es transmitida al interior del secador, mientras que otra es reflejada. Después, una fracción de la radiación transmitida al interior es reflejada en forma de longitud de onda corta desde la superficie del producto hacia la atmósfera a través de la cubierta. La cantidad restante es absorbida por el

producto a deshidratar, por lo cual su temperatura incrementa y este emite radiación de longitud de onda larga, la cual no escapa hacia el ambiente externo debido a la presencia de la cubierta transparente. Así la temperatura en el interior del sistema se incrementa. La cubierta transparente también cumple con el objetivo de reducir las pérdidas de calor por convección directa hacia el ambiente, y así evitar que la temperatura en el interior del sistema disminuya. Las pérdidas de calor o energía por convección y evaporación se producen en el interior del secador del producto hacia sus alrededores. Finalmente, la humedad producida por la evaporación de agua del producto a deshidratar, es retirada del secador por una chimenea mediante convección natural o por medio de un flujo de aire inducido por ventiladores mediante convección forzada (Kumar, Tiwari, Kumar, & Pandey, 2006).

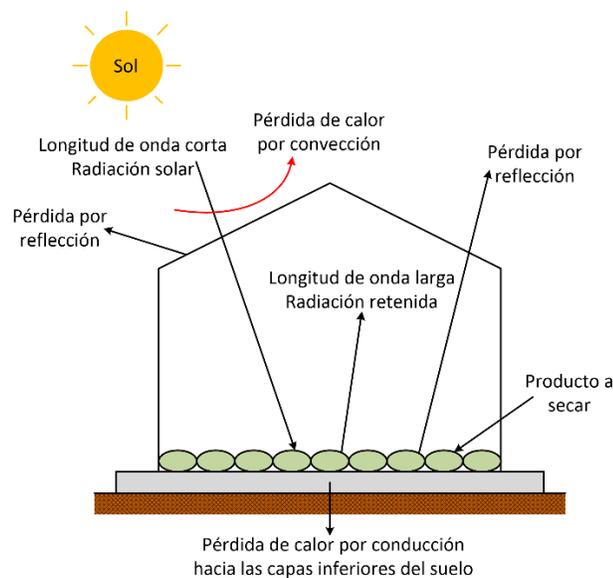


Figura 2. Procesos físicos de radiación, convección y conducción que ocurren en un secador solar tipo invernadero (Adaptado de Sahdev, 2014).

2.5 Modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección natural

Una de las principales ventajas de los sistemas de secado solar de convección natural sobre los de convección forzada, es que los primeros requieren una inversión económica relativamente menor gracias a su bajo costo de operación y

mantenimiento (Bala & Debnath, 2012), por lo cual, a pesar de tener dificultades en el control de temperatura y una limitada tasa de secado, los secadores solares pasivos aparecen como una opción más viable para su uso a escala doméstica (Janjai & Bala, 2012). De acuerdo a la literatura, se han aplicado tres enfoques para modelar matemáticamente los secadores solares tipo invernadero con convección natural: modelos mecanicistas, modelos empíricos y de forma muy incipiente modelos numéricos o de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Los modelos mecanicistas, también llamados teóricos, se basan en general en primeros principios y en particular en los procesos de transferencia de masa y energía que se llevan a cabo durante el secado y en el ambiente del invernadero-secador. Es posible obtener un modelo dinámico representado por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (en general no lineales) mediante balances instantáneos de energía y materia en estado no estacionario en la cubierta, para el aire dentro del invernadero, dentro del producto, y en el piso del secador. Dado que el modelo resultante es altamente no lineal, las soluciones son necesariamente numéricas. Algunos investigadores, se han dado a la tarea de trabajar con este tipo de modelos para estudiar el cambio en el tiempo de las temperaturas del aire dentro del secador, del producto, del suelo y la cubierta, además del cambio en el contenido de humedad del producto durante el proceso de deshidratado (Kumar & Tiwari, 2006a; Farhat, Kooli, Kerkeni, Maalej, Fadhel, & Belghith, 2004).

Algunos otros trabajos reportan el estudio del coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual es un parámetro importante en la simulación de la tasa de secado, ya que la diferencia de temperatura entre el aire y el producto varía con este coeficiente (Anwar & Tiwari, 2001). Este problema ha sido abordado en secadores solares tipo invernadero con convección natural para el secado de Khoa (Kumar, 2014) y bajo condiciones de no-carga (Chauhan & Kumar, 2016).

Aunque las cinéticas de secado de un material pueden ser descritas usando propiedades de transporte conjuntamente con las propiedades del medio de secado, en el caso de productos agrícolas se usa una constante de secado en

vez de las propiedades de transporte y es definida mediante la ecuación de capa fina (Togrul & Pehlivan, 2004). Existen numerosos estudios que han abordado este tema en la generación de diferentes modelos para una gran cantidad de productos. En el caso específico de secadores solares tipo invernadero pasivos, se han utilizado los modelos de capa fina para estudiar la cinética de secado de amaranto (Ronoh, Kanali, Mailutha, & Shitanda, 2010), coco (Arun & Sreenarayanan, 2014), pimiento rojo (Fadhel, Kooli, Farhat, & Belghith, 2014) y tomate (Sacilik, Keskin, & Elicin, 2006; Demir & Sacilik, 2010),

Los modelos basados en lógica difusa son una opción poco usada, hasta la fecha, para la modelación del clima de secadores solares. Recientemente se ha iniciado el uso de modelos neuro-difusos (Prakash & Kumar, 2014a) que combinan las ventajas de los sistemas de lógica difusa con redes neuronales artificiales.

También es posible obtener modelos espaciales representados mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, para varias variables del sistema, llevando a cabo balances integrales de materia y/o energía. Las ecuaciones resultantes son generalmente no lineales y requieren soluciones numéricas. Al igual que la lógica difusa, la Dinámica de Fluidos Computacional es un enfoque que se ha aplicado solo en forma incipiente en la modelación de secadores solares tipo invernadero de convección natural (Lokeswaran & Eswaramoorthy, 2013; Somsila & Teeboonma, 2014). De acuerdo con Versteeg y Malalasekera (1995), las ventajas que proporciona el análisis mediante CFD respecto a los enfoques basados en experimentación, se pueden resumir en: reducción sustancial de tiempos y costos para la generación de nuevos diseños, posibilidad de analizar sistemas en condiciones difíciles de ejecutar experimentalmente, capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas, y finalmente, el nivel de detalle es prácticamente ilimitado; es decir, los métodos experimentales son más caros cuando mayor es el número de puntos de medida, mientras que los códigos de CFD pueden generar un gran volumen de resultados sin costo añadido, con lo cual resulta más fácil hacer estudios paramétricos.

La CFD comprende las ecuaciones de Navier-Stokes, expresadas como un grupo de ecuaciones diferenciales parciales. Estas ecuaciones pueden ser representadas en la forma de la ecuación (1):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho u\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (1)$$

donde, ∂ es la derivada, ρ la densidad, kg m^{-3} , t es el tiempo, ∇ la divergencia, ϕ variable de estado considerada (por ejemplo, temperatura del aire y peso del producto a deshidratar), u es la velocidad del viento, m s^{-2} , Γ el coeficiente de difusión, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ y S el término fuente.

En el Cuadro 1 se muestra un resumen de las investigaciones sobre modelación matemática en secadores solares tipo invernadero de convección natural, indicando un resumen del trabajo realizado y la referencia del mismo.

Cuadro 1. Trabajos previos sobre modelación matemática en secadores solares tipo invernadero con convección natural.

No.	Autor/es	año	Trabajo realizado
1	Kumar y Tiwari	2006a	Desarrollaron y evaluaron un modelo que incluye una ecuación diferencial ordinaria para predecir la temperatura de azúcar palmera.
2	Farhat <i>et al.</i>	2004	Propusieron una ecuación diferencial ordinaria para simular la pérdida de humedad del pimiento en función de la tasa de ventilación, temperatura del aire, temperatura del producto y radiación solar transmitida a través de la cubierta del secador.
3	Kumar	2014	Estudió los coeficientes de transferencia de masa y calor por convección de la khoa en función de su tamaño durante el proceso de secado.
4	Chauhan & Kumar	2016	Evaluaron el factor de utilización de calor, el coeficiente de transferencia de calor por convección y el coeficiente de difusividad mediante un análisis de eficiencia térmica para un secador con aislamiento en la pared norte, en condiciones de no-carga.
	Ronoh <i>et al.</i>	2010	Utilizaron seis modelos de capa fina para estudiar el proceso de secado de granos de amaranto.

5	Arun y Sreenarayanan	2014	Probaron 10 modelos matemáticos de capa fina para describir la cinética de secado del coco.
6	Fadhel <i>et al.</i>	2014	Estudiaron seis modelos de capa fina para estudiar el proceso de secado de pimienta roja bajo tres diferentes condiciones.
7	Sacilik <i>et al.</i>	2006	Emplearon 10 modelos de capa fina para estudiar el proceso de secado de tomate orgánico en un secador solar tipo túnel.
8	Demir y Sacilik	2010	Utilizaron y compararon cinco modelos de capa fina para determinar la cinética de secado del tomate.
9	Prakash y Kumar	2014a	Desarrollaron y evaluaron un modelo neurodifuso para predecir la temperatura de azúcar de palmera, temperatura del secador y humedad evaporada.
10	Lokeswaran y Eswaramoorthy	2013	Desarrollaron un análisis numérico mediante CFD de un secador solar tipo invernadero sin producto a deshidratar en su interior. El modelo del secador fue desarrollado en GAMBIT y analizado en FLUENT 6.3.26
11	Somsila & Teeboonma	2014	Estudiaron la distribución de temperatura y circulación de aire en el interior de un secador solar tipo invernadero para caucho mediante CFD.

2.6 Modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección forzada

De acuerdo con Bala y Janjai (2013), el éxito alcanzado por los secadores de convección natural ha sido limitado debido a la baja tasa de flujo de aire inducido causada por la flotabilidad. Esto ha provocado que los investigadores concentren sus esfuerzos en el desarrollo de secadores solares de convección forzada operados mediante energía proveniente de la red eléctrica, de combustibles fósiles, y principalmente, del uso de paneles fotovoltaicos (PF). Los secadores solares tipo invernadero de convección forzada tienen algunas ventajas sobre los de convección natural, entre ellas, es que normalmente son utilizados a escala industrial por la gran capacidad de carga de producto que pueden secar, o bien, las variables del microclima en este tipo de secadores pueden ser controladas de una forma mucho más precisa.

En la actualidad, uno de los modelos de secador más difundidos a nivel de investigación y comercial, es el secador solar tipo invernadero de forma parabólica PF-ventilado. Este fue desarrollado originalmente en el Laboratorio de Investigación en Energía Solar, en Silpakorn, Universidad de Tailandia (Bala y Janjai, 2013).

A diferencia de los secadores solares pasivos, en los secadores solares activos, los trabajos de investigación se han limitado al uso de modelos teóricos y empíricos, dejando de lado la aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional, el cual aún necesita ser aplicado a este sistema.

En el caso de los secadores solar tipo invernadero de convección forzada, también se ha estudiado el comportamiento temporal tanto de la variable temperatura como de la humedad del producto a secar, esto gracias al desarrollo de modelos basados en balances de masa y energía, que finalmente concluyen en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. Es importante resaltar que, para el desarrollo del balance de energía en estados no estacionario, los investigadores asumen varios supuestos que permiten simplificar el sistema y procesos modelados (Jain & Tiwari, 2004b; Kumar & Tiwari, 2006a; Janjai *et al.*, 2009; Tiwari, Tripathi, & Tiwari, 2016):

- (i) La capacidad calorífica de la cubierta y la estructura del secador es despreciable.
- (ii) Se considera una sola capa de producto a secar.
- (iii) No existe estratificación en la temperatura del aire del secador.
- (iv) La absorptividad del aire es despreciable
- (v) La fracción de radiación solar que se pierde a través de la pared norte es despreciable.

Los modelos teóricos dinámicos planteados por diferentes autores pueden definirse en forma genérica, mediante una ecuación diferencial ordinaria de primer orden no-lineal de la forma:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t), p); \quad x_{t_0} = x_0 \quad (2)$$

donde $x \in R^n$, $u \in R^m$, $p \in R^q$ y $x_0 \in R^n$. El vector de las variables de estado (x) contiene las variables que caracterizan sistema, tales como temperatura (del aire, producto y cubierta), razón de humedad en el interior del secador y contenido de humedad del producto a deshidratar. El vector de las variables de entrada (u) contiene variables que expresan el efecto del ambiente sobre el comportamiento del sistema, tales como la temperatura y humedad del aire exterior, así como la radiación solar global y tasas de ventilación. El vector (p) representa los parámetros termodinámicos del modelo tales como los coeficientes de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. En general, f es una función vectorial no-lineal, por lo que el modelo dinámico no tiene solución analítica y este debe ser resuelto mediante integración numérica. A partir de las ecuaciones de estado (2) se pueden calcular otras variables llamadas salidas del sistema (y). La ecuación algebraica general no lineal es entonces:

$$y = g(x(t), u(t), p) \quad (3)$$

Algunas variables de salida en los modelos matemáticos de un secador solar son las mismas variables de estado o una transformación de ellos que permita su comparación con los datos medidos por los sensores. Dado que los sistemas de ecuaciones resultantes son altamente no lineales, su solución es necesariamente numérica. El método más empleado por los diferentes autores para la solución del sistema resultante es el de diferencias finitas (Janjai, Srisittipokakun, & Bala, 2008; Janjai *et al.* 2009; Janjai, Intawee, Kaewkiew, Sritus, & Khamvongsa, 2011; Janjai, 2012; Janjai, Phusampao, Nilnont, & Pankaew, 2014; Jitjack, Thepa, Sudaprasert, & Namprakai, 2016).

Existen otras investigaciones que incluyen el desarrollo de modelos para simular el proceso de secado de diferentes productos agrícolas (Bekkioui, Hakam, Zoulalian, & Sesbou, 2011; Aghbashlo, Müller, Mobli, Madadlou, & Rafiee, 2015; Azaizia, Kooli, Elkhadraoui, Hamdi, & Guizani, 2017), la eficiencia térmica del secador (Almuhanna, 2012; Tiwari *et al.*, 2016) y la obtención del coeficiente de transferencia de calor por convección durante el secado de cebolla (Kumar & Tiwari, 2007), uvas (Barnwal, & Tiwari, 2008) y papas (Kumar, 2013), incluso es

posible encontrar modelos matemáticos mecanicistas que ha sido utilizados conjuntamente con un modelo económico para encontrar las dimensiones óptimas para un secador solar de Chile (Hossain *et al.*, 2005).

Referente a los modelos de capa fina en secadores solares tipo invernadero de convección forzada, estos se han aplicado en el estudio de secado de tomate (Prakash & Kumar, 2014b). A diferencia de los modelos teóricos, los modelos empíricos permiten resumir datos y relacionar variables de entrada y salida de un sistema. Las redes neuronales artificiales son modelos empíricos o de caja negra, no-lineales, que han sido empleados para describir y explicar el comportamiento del proceso de secado de yaca (Bala, Ashraf, Uddin, & Janjai, 2005) y hojas de caucho (Janjai, Piwsaoad, Nilnont, & Pankaew, 2015) en secadores solares tipo invernadero de convección forzada. Las redes neuronales artificiales requieren de una gran cantidad de datos y mucho tiempo para su entrenamiento. También muy recientemente la lógica difusa ha sido aplicada para la predicción de la tasa de evaporación de humedad en azúcar de palmera (Prakash, Kumar, Kaviti, & Kumar, 2015) y los modelos neuro-difusos para simular el comportamiento de un secador tipo invernadero bajo condiciones de no-carga.

En el Cuadro 2 se muestra un resumen de las investigaciones sobre modelación matemática en secadores solares tipo invernadero de convección forzada, indicando un resumen del trabajo realizado y la referencia del mismo.

Cuadro 2. Trabajos previos sobre modelación matemática en secadores solares tipo invernadero con convección forzada.

No	Autor/es	año	Trabajo realizado
1	Tiwari <i>et al.</i>	2016	Estudiaron un secador (con un panel fotovoltaico integrado) mediante balances de energía para predecir la temperatura del panel y del aire en el interior. Además, utilizaron una ecuación diferencial ordinaria para predecir la temperatura del producto,
2	Janjai <i>et al.</i>	2008	Analizaron el rendimiento de un secador con un colector solar en el techo, utilizando un modelo basado en ecuaciones diferenciales ordinarias para el análisis del colector y un sistema de ecuaciones diferenciales parciales para el análisis del secador.

3	Janjai <i>et al.</i>	2009	Implementaron un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, para describir la transferencia de calor y humedad de longan (fruta asiática perteneciente a la familia del litchi) y plátano pelados durante el proceso de secado en un secador solar PF-ventilado.
4	Janjai <i>et al.</i>	2011	Desarrollaron un modelo basado en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, para describir la transferencia de calor y humedad de chile, plátano y café durante el secado.
5	Janjai	2012	Generó un modelo con un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, para describir la transferencia de calor y humedad de tomate deshidratado osmóticamente.
6	Janjai <i>et al.</i>	2014	Implementaron un modelo mediante ecuaciones diferenciales parciales, para describir la transferencia de calor y humedad de nueces de macadamia durante el proceso de secado.
7	Jitjack <i>et al.</i>	2016	Probaron y generaron un sistema de ecuaciones diferenciales parciales para predecir la temperatura del aire en el interior de un secador para deshidratado de caucho.
8	Bekkioui <i>et al.</i>	2011	Desarrollaron y validaron un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales ordinarias para simular el proceso de secado de madera.
9	Aghbashlo <i>et al.</i>	2015	Combinaron un modelo que describe la tasa de secado en equilibrio y los principios del modelo de capa fina. El modelo fue evaluado experimentalmente y utilizaron TRNSYS para simular el proceso de secado de flores de manzanilla.
10	Azaizia <i>et al.</i>	2017	Trabajaron con un modelo mecanicistas de un secador tipo invernadero con un colector solar acoplado, para estudiar la influencia del área del producto a deshidratar, la tasa del flujo de aire y el área del colector, sobre el cambio en el contenido de humedad del producto (pimienta), la temperatura y la humedad en el interior del secador.
11	Almuhanha	2012	Evaluó el rendimiento de un secador mediante un balance térmico derivado en ecuaciones algebraicas que muestran la distribución de la energía solar incidente en ganancia de energía útil y pérdidas térmicas.
12	Kumar y Tiwari	2007	Evaluaron el efecto del tamaño del lote de secado sobre el coeficiente de transferencia de calor por convección en el secado de cebolla.

13	Barnwal, y Tiwari	2008	Estudiaron el coeficiente de transferencia de calor por convección en el secado de uvas en un secador solar híbrido térmico-fotovoltaico.
14	Kumar	2013	Determinó los coeficientes promedio de transferencia de calor por convección y evaporación durante el secado de papa.
15	Hossain <i>et al.</i>	2005	Utilizaron un modelo basado en ecuaciones diferenciales parciales conjuntamente con un modelo económico (algebraico) para encontrar las dimensiones óptimas de un secador de chile.
16	Prakash y Kumar	2014b	Probaron siete modelos de capa fina para predecir el proceso de secado de tomate en rodajas.
17	Bala <i>et al.</i>	2005	Utilizaron el método de redes neuronales multicapa para predecir el rendimiento de un secador solar en forma de túnel para secado de yaca.
18	Janjai <i>et al.</i>	2015	Desarrollaron un modelo de redes neuronales multicapa para predecir el rendimiento de un secador de láminas de caucho.
19	Prakash <i>et al.</i>	2015	Hicieron uso de un modelo de lógica difusa para predecir la tasa de evaporación de humedad de azúcar de palmera en un ambiente controlado.

2.7 Modelación de secadores solares tipo invernadero con convección natural y forzada

Algunos investigadores han optado por el desarrollo de trabajos complementarios, en los cuales han desarrollado un modelo térmico para un secador tanto en convección natural como forzada (Jain & Tiwari, 2004b). Pero cabe destacar que estos trabajos se han concentrado principalmente en el estudio del coeficiente de transferencia de calor (Jain & Tiwari, 2004a; Tiwari, Kumar, & Prakash, 2004) y masa (Kumar & Tiwari, 2006b; Kumar, Kasana, Kumar, & Prakash, 2011) por convección para distintos productos agrícolas.

En el Cuadro 3 se muestra un resumen de las investigaciones comparativas entre secadores solares tipo invernadero de convección natural y forzada.

Cuadro 3. Trabajos desarrollados sobre secadores solares tipo invernadero con convección natural y forzada.

No	Autor/es	año	Trabajo realizado
1	Jain y Tiwari	2004b	Desarrollaron modelos teóricos basados en ecuaciones diferenciales ordinarias para estudiar el comportamiento térmico de col y chícharo al ser sometidos al proceso de secado a sol abierto y bajo invernadero (en convección natural y forzada).
2	Tiwari <i>et al.</i>	2004	Evaluaron el comportamiento del coeficiente de transferencia de masa por convección durante el proceso de secado de azúcar de palmera.
3	Jain y Tiwari	2004a	Estudiaron el coeficiente de transferencia de masa por convección y la tasa de humedad removida en el deshidratado de col y chícharo (a sol abierto y bajo invernadero) como función de algunos parámetros climáticos.
4	Kumar y Tiwari	2006b	Estudiaron el efecto del tamaño y forma de las muestras a secar sobre el coeficiente de transferencia de masa durante el proceso de secado de azúcar de palmera.
5	Kumar <i>et al.</i>	2011	Investigaron el coeficiente de transferencia de calor por convección durante el secado de khoa (producto de India similar al queso) a sol abierto y bajo invernadero (en convección natural y forzada).

2.8 Análisis crítico

Hasta ahora los modelos matemáticos dinámicos propuestos para secadores solares tipo invernadero, han sido principalmente teóricos y describen la tasa de secado de un producto agrícola, o bien, el comportamiento de las variables del microclima dentro de un secador. Estos modelos normalmente son evaluados mediante datos recabados en experimentos, sin embargo, no han sido resultado de la aplicación de todas las etapas que contempla el procedimiento de generación de modelos dinámicos de sistemas (van Straten, 2008). No se encuentran en la literatura de modelación de secadores solares estudios sobre análisis de sensibilidad, estimación de parámetros (calibración), análisis de incertidumbre y evaluación. Este análisis es necesario para conocer el comportamiento de los modelos e incrementar la confiabilidad de sus predicciones antes de ser usados en diseño, optimización y control. Tampoco se

ha explorado en qué medida la calidad predictiva de un modelo matemático dinámico del proceso de secado de productos agrícolas puede ser mejorada mediante métodos de asimilación de datos como filtros de Kalman no lineales, filtrado de partículas y asimilación de datos variacional. Por lo tanto, esta puede ser una línea de investigación nueva. Además de desarrollar modelos dinámicos del sistema secador solar tipo invernadero se requiere aplicar la teoría de sistemas para para generar modelos realistas.

En la literatura se muestra que el método de diferencias finitas, es el método más empleado para resolver las ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales propuestas por algunos autores para dar cuenta del cambio de la variable temperatura y humedad de diferentes componentes del sistema secador (Janjai *et al.* 2009; Janjai, 2012). Una línea posible de trabajo e investigación es el uso de métodos numéricos clásicos como el método de Euler, Runge-Kutta de segundo orden, Runge-Kutta de cuarto orden, o métodos para sistemas rígidos, para la integración de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales (Press *et al.*, 1997). Estos métodos se encuentran disponibles en ambientes de simulación como Matlab-Simulink, Fortran Simulation Translator (FST), lenguaje de programación R, etc. O bien pueden codificarse con un lenguaje de programación genérico como C o FORTRAN.

Además, aunque raramente se han usado los modelos dinámicos de secadores solares solares tipo invernadero en el planteamiento y solución de problemas de optimización dinámica mediante la aplicación de la teoría de control óptimo. Esta es una línea de investigación para trabajo futuro ya que el sistema secador solar puede operarse de forma óptima haciendo un uso mínimo de energía. También se puede buscar optimizar el tiempo de secado combinando la energía solar con otras fuentes de energía (Gallestey & Paice, 1997).

Existen muy pocos trabajos de investigación enfocados en el uso de las redes neuronales artificiales, sistemas de lógica difusa y modelos neuro-difusos para aplicaciones en modelación de secadores solares tipo invernadero. La principal ventaja de estos métodos es que permiten obtener un modelo matemático del sistema a partir de datos experimentales de las señales de entrada y salida, sin

necesidad de tener un conocimiento detallado de los procesos físicos que ocurren en un SSSTI. Además, el proceso de generación de estos modelos es más corto comparado con el tiempo que requiere un modelo mecanicista o de CFD. Referente a los modelos autoregresivos con entradas exógenas (ARX), estos pueden utilizarse una alternativa a los modelos mecanicistas o teóricos para la optimización y control del secador solar y el proceso de secado.

Por otro lado, es importante resaltar que el estudio de secadores solares tipo invernadero mediante Dinámica de Fluidos Computacional sigue siendo un campo de interés, ya que hasta la fecha este problema no ha sido abordado con detalle, y la poca investigación que existe, se ha centrado en el estudio del secador sin producto en su interior. Además, en el caso del diseño de este tipo de tecnología, normalmente se ha utilizado el enfoque experimental, por lo cual, determinar el comportamiento y eficiencia de un diseño con certeza, requiere la construcción de modelos a escala de las situaciones y la observación del comportamiento bajo condiciones realistas, lo cual requiere de tiempos largos e incluso considerables presupuestos para la obtención de resultados precisos.

Los resultados derivados de la simulación mediante CFD, pueden permitir conocer de una forma rápida y económica, el comportamiento de las variables del microclima dentro del secador en función de las variables de diseño del mismo, es decir, es posible conocer el comportamiento espacial (variación espacial) de la temperatura (del aire, cubierta, suelo y producto), humedad, velocidad y dirección del aire, en función de la geometría del secador (techo plano, parabólico, esférico, entre otros), su orientación, el mecanismo de ventilación, las propiedades físicas de los materiales y las dimensiones del prototipo. Los resultados producidos por la CFD constituyen una base fiable a partir de la cual es posible considerar nuevas medidas de diseño de secadores solares tipo invernadero. Por lo tanto, existe un enorme potencial de los modelos de CFD bidimensionales o tridimensionales no solo para entender mejor el comportamiento espacial de las variables de interés, sino también para mejorar el diseño y optimizar este sistema.

2.9 Conclusiones

Hasta ahora, se han desarrollado múltiples modelos teóricos y empíricos para la simulación de los procesos y variables dentro de un secador solar tipo invernadero, sin embargo, son muy limitadas las investigaciones relacionadas con la aplicación de este tipo de modelos en el manejo de los secadores solares mediante la aplicación de diferentes algoritmos de control y enfoques de la Teoría de Sistemas y Control (como control clásico, óptimo, predictivo, adaptable e inteligente) para obtener el desempeño deseado. Por lo tanto, el desarrollo de sistemas de control para mejorar el desempeño del sistema secador solar tipo invernadero es una línea de investigación a desarrollar.

Para que los modelos dinámicos del ambiente secador solar tipo invernadero sean una herramienta para conocer mejor el funcionamiento del sistema y también sean útiles para diseñar, optimizar y controlarlo, la generación de su estructura debe complementarse con análisis de sensibilidad, calibración, evaluación, análisis de incertidumbre y asimilación de datos.

En el caso de los modelos de capa fina, se hace difícil su aplicación en secadores solares tipo invernadero, ya que están estructurados en función del tiempo, sin embargo, el parámetro más importante a considerar es la radiación global, ya que de ella depende en gran medida la temperatura en el interior del secador, por lo cual, es necesario generar modelos de capa fina que incluyan en su estructura el comportamiento de la radiación a lo largo del día.

Los modelos matemáticos que permiten estudiar el comportamiento espacial de un secador solar tipo invernadero representado por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales utilizan soluciones numéricas basadas en Dinámica de Fluidos Computacional, solo se han aplicado de manera incipiente. Por lo tanto, existe un gran potencial para futuras investigaciones como una herramienta muy importante que puede contribuir a la generación un diseño de secador solar, cuya distribución de las variables climáticas en el interior sea la más adecuada para el secado de diferentes productos agrícolas.

2.10 Literatura citada

Aghbashlo, M., Müller, J., Mobli, H., Madadlou, A., & Rafiee, S. (2015). Modeling and simulation of deep-bed solar greenhouse drying of chamomile flowers. *Drying Technology*, 33(6), 684-695. doi: 10.1080/07373937.2014.981278

Almuhanna, E. A. (2012). Utilization of a solar greenhouse as a solar dryer for drying dates under the climatic conditions of the eastern province of Saudi Arabia: Part I: Thermal performance analysis of a solar dryer. *Journal of Agricultural Science*, 4(3), 237-246. doi:10.5539/jas.v4n3p237

Anwar, S. I., & Tiwari, G. N. (2001). Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions. *Energy Conversion and Management*, 42(5), 627-637. doi: 10.1016/S0196-8904(00)00065-0

Arun, S., & Sreenarayanan, V. V. (2014). Mathematical modeling of solar tunnel greenhouse dryer for describing the drying kinetics of copra. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 4(5), 2278–3075. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=9ABE66E3746495B96CC54A47705E7A63?doi=10.1.1.676.1250&rep=rep1&type=pdf>

Azaizia, Z., Kooli, S., Elkhadraoui, A., Hamdi, I., & Guizani, A. (2017). Investigation of a new solar greenhouse drying system for peppers. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.180

Bala B. K. (1997). *Drying and storage of cereal grains*. India: Oxford & IBH Pub. Co. Pvt. Ltd.

Bala, B. K. (2016). *Drying and storage of cereal grains* (2da ed.) John Wiley & Sons.

Bala, B. K., Ashraf, M. A., Uddin, M. A., & Janjai, S. (2005). Experimental and neural network prediction of the performance of a solar tunnel drier for drying jackfruit bulbs and leather. *Journal of Food Process Engineering*, 28(6), 552-566. doi: 10.1111/j.1745-4530.2005.00042.x

Bala, B. K., & Debnath, N. (2012). Solar Drying Technology: Potentials and Developments. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2, doi:10.4303/jfrea/R120302

Bala, B. K., & Janjai, S. (2013). Solar drying of agricultural products. *Stewart Postharvest Review*, 9(2), 1-8. doi: 10.2212/spr.2013.2.4

Bala, B. K., & Woods, J. L. (1994). Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy*, 53(3), 259-266. doi: 10.1016/0038-092X(94)90632-7

Barnwal, P., & Tiwari, G. N. (2008). Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: an experimental study. *Solar Energy*, 82(12), 1131-1144. doi:10.1016/j.solener.2008.05.012

- Bekkioui, N., Hakam, A., Zoulalian, A., & Sesbou, A. (2011). Solar drying of pine lumber: Verification of a mathematical model. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 13(1), 29-40. doi: 10.4067/S0718-221X2011000100003
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665-1691. doi: 10.1016/j.solener.2009.10.001
- Can, A. (2000). Drying kinetics of pumpkinseeds. *International Journal of energy research*, 24(11), 965-975. doi:10.1002/1099-114X(200009)24:11<965::AID-ER635>3.0.CO;2-W
- Chauhan, P. S., & Kumar, A. (2016). Performance analysis of greenhouse dryer by using insulated north-wall under natural convection mode. *Energy Reports*, 2, 107-116. doi: 10.1016/j.egy.2016.05.004
- Chauhan, P. S., Kumar, A., & Gupta, B. (2016). A review on thermal models for greenhouse dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.023
- Demir, K., & Sacilik, K. (2010). Solar drying of Ayaş tomato using a natural convection solar tunnel dryer. *J. Food Agric. Environ*, 8(1), 7-12. Obtenido de http://world-food.net/download/journals/2010-issue_1/1.pdf
- El-Sebaili, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37-43. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.134
- Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349-359. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2003.08.007
- Fadhel, A., Kooli, S., Farhat, A., & Belghith, A. (2014). Experimental study of the drying of hot red pepper in the open air, under greenhouse and in a solar drier. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014(2014), 1-14. doi: 10.5171/2014.515285.
- Farhat, A., Kooli, S., Kerkeni, C., Maalej, M., Fadhel, A., & Belghith, A. (2004). Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse. *International journal of thermal sciences*, 43(1), 53-58. doi: 10.1016/S1290-0729(03)00098-X
- Flores-Velázquez, J., López-Cruz, I. L., Mejía-Sáenz, E., & Montero-Camacho, J. I. (2014). Evaluación del desempeño climático de un invernadero Baticenital del centro de México mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). *Agrociencia*, 48(2), 131-146. Obtenido de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n2/v48n2a1.pdf>
- Flores-Velázquez, J., Rojano-Aguilar, A., Rico-García, E., De la Torre-Gea, G., & López-Cruz, I. L. (2012). Advances in Computational Fluid Dynamics Applied to the Greenhouse Environment. INTECH Open Access Publisher. Obtenido de: <http://www.intechopen.com/books/applied-computational-fluid->

dynamics/advances-in-computational-fluid-dynamics-applied-to-the-greenhouse-environment

Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1-30. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.032

Gallestey, E., & Paice, A. D. (1997). Mathematical modelling and optimal control of solar dryers. *Mathematical Modelling of Systems*, 3(4), 297-322. doi: 10.1080/13873959708837063

Hossain, M. A., Woods, J. L., & Bala, B. K. (2005). Optimisation of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss. *Renewable Energy*, 30(5), 729-742. doi: 10.1016/j.renene.2004.01.005

Jain, D., & Tiwari, G. N. (2004a). Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: Evaluation of convective mass transfer coefficient. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 765-783. Doi: 10.1016/S0196-8904(03)00178-X

Jain, D., & Tiwari, G. N. (2004b). Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection II. Thermal modeling and experimental validation. *Energy Conversion and management*, 45(17), 2777-2793. doi: 10.1016/j.enconman.2003.12.011

Janjai, S. (2012). A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination. *International Journal of Energy Environment*, 3(3), 383-398. Obtenido de: http://www.ijee.ieefoundation.org/vol3/issue3/IJEE_05_v3n3.pdf

Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar drying technology. *Food Engineering Reviews*, 4(1), 16-54. doi: 10.1007/s12393-011-9044-6

Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C., & Khamvongsa, V. (2011). A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 36(3), 1053-1062. doi: 10.1016/j.renene.2010.09.008

Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B. K., Nagle, M., & Müller, J. (2009). Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, 83(9), 1550-1565. doi: 10.1016/j.solener.2009.05.003

Janjai, S., Phusampao, C., Nilnont, W., & Pankaew, P. (2014). Experimental performance and modeling of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(6), 1155-1161. Obtenido de: <http://www.ijser.org/researchpaper%5CExperimental-performance-and-modeling-of-a-greenhouse-solar-dryer.pdf>

Janjai, S., Piwsaoad, J., Nilnont, W., & Pankaew, P. (2015). Experimental Performance and Neural Network Modeling of a Large-scale Greenhouse Solar

Dryer for Drying Natural Rubber Sheets. *Journal of Control Science and Engineering*, 3(1), 48-53. doi: 10.17265/2328-2231/2015.01.006

Janjai, S., Srisittipokakun, N., & Bala, B. K. (2008). Experimental and modelling performances of a roof-integrated solar drying system for drying herbs and spices. *Energy*, 33(1), 91-103. doi: 10.1016/j.energy.2007.08.009

Jitjack, K., Thepa, S., Sudaprasert, K., & Namprakai, P. (2016). Improvement of a rubber drying greenhouse with a parabolic cover and enhanced panels. *Energy and Buildings*, 124, 178-193. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.04.030

Kumar, M. (2013). Forced convection greenhouse papad drying: An experimental study. *Journal of Engineering, Science and Technology*, 8(2), 177-189. Obtenido de: https://www.researchgate.net/profile/Mahesh_Kumar83/publication/255722806_Forced_convection_greenhouse_papad_dryingAn_experimental_study/links/5487ebb80cf2ef34478ed238/Forced-convection-greenhouse-papad-dryingAn-experimental-study.pdf

Kumar, M. (2014). Effect of size on the convective heat and mass transfer coefficients during natural convection greenhouse drying of khoa-a heat desiccated milk product. *International Journal of Renewable Energy and Biofuels*, 2014, 1-11. doi: 10.5171/2014.961114

Kumar, M., Kasana, K. S., Kumar, S. & Prakash, O. (2011). Experimental investigation on convective heat transfer coefficient for khoa drying. *International Journal of Current Research*, 3(8), 88-93.

Obtenido de: <http://www.journalcra.com/sites/default/files/Download%20901.pdf>

Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2006a). Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation. *Solar Energy*, 80(9), 1135-1144. doi: 10.1016/j.solener.2005.09.011

Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2006b). Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient during greenhouse drying (GHD) of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 73(2), 121-134. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.01.011

Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2007). Effect of mass on convective mass transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of onion flakes. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1337-1350. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.04.026

Kumar, A., Tiwari, G. N., Kumar, S., & Pandey, M. (2006). Role of greenhouse technology in agricultural engineering. *International Journal of Agricultural Research*, 1(4), 364-372. Obtenido de: <https://www.researchgate.net/publication/265249365>

Lokeswaran, S., & Eswaramoorthy, M. (2013). An experimental analysis of a solar greenhouse drier: computational fluid dynamics (CFD) validation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(21), 2062-2071. doi: 10.1080/15567036.2010.532195

- Pangavhane, D. R., Sawhney, R. L., & Sarsavadia, P. N. (2002). Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, 27(6), 579-590. doi: 10.1016/S0360-5442(02)00005-1
- Prakash, O., & Kumar, A. (2013). Historical review and recent trends in solar drying systems. *International Journal of Green Energy*, 10(7), 690-738. doi: 10.1080/15435075.2012.727113
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014a). ANFIS modelling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation. *International Journal of Sustainable Energy*, 33(2), 316-335. doi: 10.1080/14786451.2012.724070
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014b). Environomical analysis and mathematical modelling for tomato flakes drying in a modified greenhouse dryer under active mode. *International Journal of Food Engineering*, 10(4), 669-681. doi: 10.1515/ijfe-2013-0063
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014c). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 905-910. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.084
- Prakash, O., Kumar, A., Kaviti, A. K., & Kumar, P. V. (2015). Prediction of the rate of moisture evaporation from jaggery in greenhouse drying using the fuzzy logic. *Heat Transfer Research*, 46(10). doi: 10.1615/HeatTransRes.2015007463
- Prakash, O., Laguri, V., Pandey, A., Kumar, A., & Kumar, A. (2016). Review on various modelling techniques for the solar dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 396-417. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.028
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P. (1997). *Numerical recipes in C. The art of scientific computing*. Obtenido de: https://www2.units.it/ipl/students_area/imm2/files/Numerical_Recipes.pdf
- Ronoh, E. K., Kanali, C. L., Mailutha, J. T., & Shitanda, D. (2010). Thin layer drying kinetics of amaranth (*Amaranthus cruentus*) grains in a natural convection solar tent dryer. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 10(3). doi: 10.4314/ajfand.v10i3.54080
- Sacilik, K., Keskin, R., & Elicin, A. K. (2006). Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of food Engineering*, 73(3), 231-238. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.01.025
- Sahdev, R. K. (2014). Open sun and greenhouse drying of agricultural and food products. A review. *International Journal of Engineering*, 3(3). 1053-1066. Obtenido de: https://www.researchgate.net/profile/Ravinder_Sahdev/publication/305082489_Open_Sun_and_Greenhouse_Drying_of_Agricultural_and_Food_Products_A_Review/links/5794c30508aed51475ceff34.pdf
- Somsila, P., & Teeboonma, U. (2014). Investigation of temperature and air flow inside Para rubber greenhouse solar dryer incline roof type by using CFD

technique. *Advanced Materials Research*, 931-932. 1238-1242. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1238

Tiwari, G. N., Kumar, S., & Prakash, O. (2004). Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 63(2), 219-227. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2003.07.003

Tiwari, S., Tripathi, R., & Tiwari, G. N. (2016). Thermal Analysis of Photovoltaic Integrated Greenhouse Solar Dryer. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 10(1), 81-85. Obtenido de: <http://www.waset.org/publications/10003509>

Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 413-425. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001

van Straten, G. (2008). What can systems and control theory do for agricultural science?. *Automatika: Časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, 49(3-4), 105-117. Obtenido de:

http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=46123

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Obtenido de: <https://ekaoktariyantongroho.files.wordpress.com/2008/04/an-introduction-to-computational-fluid-dynamics-versteeg.pdf>

VijayaVenkataRaman, S., Iniyar, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652-2670. doi: 10.1016/j.rser.2012.01.007

Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457-465. doi: 10.1016/S0360-5442(01)00018-4

CAPÍTULO 3. CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO PARA DESHIDRATAR PRODUCTOS AGRÍCOLAS²

CONSTRUCTION AND EVALUATION OF A GREENHOUSE SOLAR DRYER SYSTEM FOR AGRICULTURAL PRODUCTS

Angel Garduño-García¹, Irineo Lorenzo López-Cruz^{1*}, Agustín Ruiz-García¹,
Eugenio Romantchik-Kriuchkova¹

3.1 RESUMEN

El secado solar a la intemperie es el método más común para preservar productos agrícolas; pero, sin condiciones climáticas adecuadas las pérdidas pueden ser graves. Los sistemas de secado con energía solar reducen las pérdidas y mejoran la calidad del producto en comparación con los métodos tradicionales. El objetivo del presente estudio fue construir y evaluar un secador solar tipo invernadero de forma parabólica, con cubierta de policarbonato y convección forzada mediante pruebas realizadas sin producto y bajo condiciones de deshidratación de *Stevia rebaudiana*. El estudio se desarrolló en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. Un sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI), de forma parabólica, se construyó con cubierta de policarbonato, piso de concreto, estructura de acero galvanizado y equipado con extractores para el control de temperatura. Su funcionamiento se evaluó mediante el monitoreo de la temperatura y humedad relativa en su interior respecto a las condiciones climáticas exteriores. Las evaluaciones se realizaron mediante cuatro pruebas en el SSSTI, dos de ellas sin producto, la primera con los extractores en funcionamiento y la segunda con estos apagados; mientras que, el tercer y cuarto experimento fueron pruebas de deshidratado de *Stevia* donde la temperatura máxima del secador se mantuvo en 45 y 50 °C, respectivamente. En la primera prueba se encontró que es factible mantener una temperatura máxima establecida (50 °C) en el secador, mientras que, en la segunda prueba se alcanzó una temperatura máxima de 69 °C en un día soleado. El contenido de humedad final de la *Stevia* en el tercer experimento fue del 12% y se obtuvo en 6 h, mientras que en el cuarto experimento fue del 13% y se obtuvo en 6.5 h. El secador construido cumplió con el propósito de deshidratar *Stevia*, a pesar de la presencia de nubosidad durante los experimentos.

² Enviado a Revista AGROCIENCIA (en revisión)

Palabra clave: *Stevia rebaudiana*, cinética de secado, costos de construcción, convección forzada, convección natural.

3.2 INTRODUCCIÓN

El uso de la energía solar en México para el deshidratado de productos agrícolas, ha cobrado importancia debido a que existen productos como frutas y verduras que, si no se comercializan de manera inmediata después de la cosecha, representan grandes pérdidas. De acuerdo con la FAO (2015), México pierde cerca del 37% de sus alimentos, entre los que destacan guayaba (*Psidium guajava* L.) (57%), leche de vaca (57%), mango (*Mangifera indica* L.) (55%), pescados (54%), aguacate (*Persea americana* Mill.) (53%), plátano (*Musa spp.*) (54%), nopal (*Opuntia spp.*) (53%), arroz (*Oryza sativa* L.) (46%) y pepino (*Cucumis sativus* L.) (45%). Una alternativa a este problema es conservar dichos productos mediante su deshidratación para incrementar la vida post-cosecha y prolongar el tiempo en el que pueden ser comercializados (Castañeda-Miranda *et al.*, 2012).

El deshidratado de productos agrícolas tiene como ventajas que el producto procesado es fácil de transportar y almacenar, además, en el caso de los granos el secado permite inducir la inhibición de la germinación. Por otro lado, existen productos agrícolas que requieren de la deshidratación como manejo post-cosecha para poder realizar su comercialización, por ejemplo, el café (*Coffea spp.*), flor de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) y *Stevia rebaudiana*. Sin embargo, la calidad de estos disminuye debido que el secado por lo regular se realiza a la intemperie o en sistemas de secado solar con ningún o limitado control del clima (Hernández *et al.*, 2010; Castañeda-Miranda *et al.*, 2012; Lemus-Mondaca *et al.*, 2016)

El método más utilizado para conservar productos agrícolas es el deshidratado a la intemperie, sin embargo, este proceso bajo condiciones climáticas hostiles conduce a pérdidas en la cantidad y calidad del producto (Pangavhane *et al.*, 2002). Estas pérdidas están relacionadas con la contaminación por suciedad,

polvo e infestación por insectos, roedores y otros animales (Janjai y Bala, 2012; Prakash *et al.*, 2016).

Una alternativa, es el uso de sistemas de secado solar con control del clima, lo cual puede reducir las pérdidas de cosechas y mejorar la calidad de productos deshidratados en comparación con métodos tradicionales (Yaldiz *et al.*, 2001). Uno de los sistemas de secado solar que destaca debido por su capacidad de procesamiento de producto, es el secador solar tipo invernadero (Janjai *et al.*, 2009).

Hay avances importantes en el diseño, construcción y uso de secadores solares tipo invernadero en Alemania, India, China y Tailandia, pero la adopción en México de estas tecnologías se dificulta por las diferencias en cuanto al clima y las características de los productos a secar entre estos países y México. Además, hay pocos estudios acerca del diseño, construcción, materiales y costo de un secador de este tipo (Fuentes-Salinas *et al.*, 2003; Hossain *et al.*, 2005), lo que dificulta la adopción de esta tecnología.

El objetivo del presente estudio fue construir y evaluar un secador solar tipo invernadero de forma parabólica, con cubierta de policarbonato y convección forzada, mediante pruebas realizadas sin producto y bajo condiciones de deshidratación de *Stevia*. Se espera que el secador construido alcance la temperatura necesaria para deshidratar *Stevia*, y que el producto procesado supere en calidad al deshidratado en invernadero convencional.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 Construcción del Sistema Secador Solar Tipo Invernadero (SSSTI)

El sistema secador solar tipo invernadero se construyó en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México (19°29' 'N, 98°53' O y a 2,250 m de altitud). El prototipo se basó en el modelo desarrollado en el Laboratorio de Investigación en Energía Solar, en Silpakorn, Universidad de Tailandia (Janjai *et al.*, 2009; Janjai *et al.*, 2011; Bala y Janjai, 2013). Este sistema presenta ventajas sobre otros secadores solares, ya que cuenta con una estructura simple,

capacidad de carga de nivel industrial y alta eficiencia térmica, además, el SSSTI se basa en la tecnología de invernaderos agrícolas, la cual ya está desarrollada, tanto en términos de materiales como de método de construcción (Janjai *et al.*, 2007). El secador se orientó en la dirección norte-sur, lo cual permite que exista uniformidad en la distribución de la radiación que incide sobre el mismo (Castilla, 2013). La estructura y las mesas se construyeron con PTR (Perfil Tubular Rectangular) de acero galvanizado calibre 14. La construcción del SSSTI incluyó las siguientes etapas.

Etapas 1

El proceso de construcción inició con la nivelación y delimitación del terreno, donde se realizó un firme de concreto de 9 x 12 x 0.15 m, armado con malla electrosoldada. En conjunto con la plancha de concreto, se colocaron una serie de anclas de 1 m de longitud para la fijación de los arcos y las columnas de la estructura.

Etapas 2

En esta fase, se instaló la estructura del secador, la cual consta de siete arcos de 11 m, 10 largueros de 6 m y cuatro columnas de 2.93 m de altura (Figura 1). El acceso al secador se colocó en la parte norte, donde se construyó un sistema de dos puertas de 2 x 2 m, una de ellas abatible y la otra corrediza. En los lados laterales de la puerta se formaron marcos de 1.23 m de ancho por 0.53 m de alto, los cuales tienen el objetivo de funcionar como ventilas. En el lado sur se colocaron dos marcos de 0.54 m x 0.54 m para la instalación de los extractores de aire. Las uniones de los largueros con los arcos se realizaron mediante abrazaderas y pijas hexagonales, mientras que las columnas y marcos se soldaron.



Figura 1. Estructura en acero galvanizado del sistema secador solar tipo invernadero construido en Chapingo, México.

Etapa 3

La tercera etapa consistió en la colocación de la cubierta compuesta de láminas de policarbonato de doble pared con 0.006 m de espesor, color cristal y protección contra rayos UV. Las láminas se sujetaron con uniones tipo H y se fijaron a la estructura con pijas. La puerta corrediza y los marcos de la pared norte, se forraron con malla antiáfidos de 40 x 26 hilos por pulgada cuadrada para evitar el ingreso de insectos al secador. Además, sobre las ventilas se colocó un sistema de persianas de policarbonato para controlar el flujo del aire a través de las mismas. El sistema de sujeción de la cubierta se recubrió con silicón para garantizar la hermeticidad del secador.

Etapa 4

En esta fase se instaló el sistema de ventilación, compuesto por dos extractores en la pared sur con una capacidad de $9,435 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ cada uno, los cuales son accionados mediante motores monofásicos de 0.5 HP (373 W) y permiten una renovación del aire en el interior del secador en un tiempo aproximado de 40 s. Los extractores se controlaron en función de la temperatura en el interior del secador mediante un termostato modelo STC-1000 (KI&BNT Electronics Co.,

Ltd). Además, en el interior se colocaron tres lámparas de halógeno para poder trabajar en el secador en ausencia de luz solar. Tanto el sistema de iluminación como el de ventilación, son manipulados mediante un tablero de control colocado en el exterior del secador.

Etapa 5

Durante esta etapa, se fabricaron 24 mesas rectangulares de acero galvanizado de 1.5 x 1.85 m y una altura de 0.9 m, con malla sintética en la base de las charolas de secado, las cuales se colocaron en el interior del secador. Alrededor del secador se coló una plancha de concreto de 0.6 m de longitud, la cual tiene una altura de 0.15 m en su parte más alta y 0.13 m en su parte más baja, el objetivo de la pendiente resultante es que, en caso de lluvia, el agua resbale hacia los lados del secador y no existan infiltraciones. El secador tiene una superficie interior de 108 m² y un volumen aproximado de 211 m³ (Figura 2).



Figura 2. Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica y cubierta de policarbonato construido en Chapingo, México.

3.3.2 Evaluación del SSSTI

3.3.2.1 Mediciones y sistema de registro de datos

Los puntos de medición durante los experimentos se distribuyeron en todo el volumen del secador (Figura 3). La temperatura del aire a la altura de las mesas

(T , °C), temperatura del aire 0.9 m por encima de las mesas (T_a , °C) y temperatura del aire de salida (T_o , °C) se monitorearon mediante sensores 108-L (Campbell Scientific Inc., EE.UU). Las temperaturas del suelo (T_s), cubierta (T_c , °C) y producto (T_p , °C), se midieron con sensores infrarrojos MLX90614, mientras que la humedad relativa del aire en el interior (RH_1 , %, y RH_2 , %) se monitoreo con sensores HMP50 (Campbell Scientific Inc., EE.UU). La temperatura (T_{amb} , °C) y humedad relativa del aire exterior (RH_{amb} , %) se registró con una estación meteorológica HOBO U30 (Onset Computer Corporation, EE.UU). Las señales generadas por lo sensores se almacenaron y promediaron cada 30 minutos para su posterior análisis. Durante el proceso de recolección de datos, los sensores se protegieron de la radiación solar mediante tubos horizontales de 0.5 m de longitud recubiertos de aluminio (Erell *et al.*, 2005). Los datos de la radiación global se tomaron de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo.

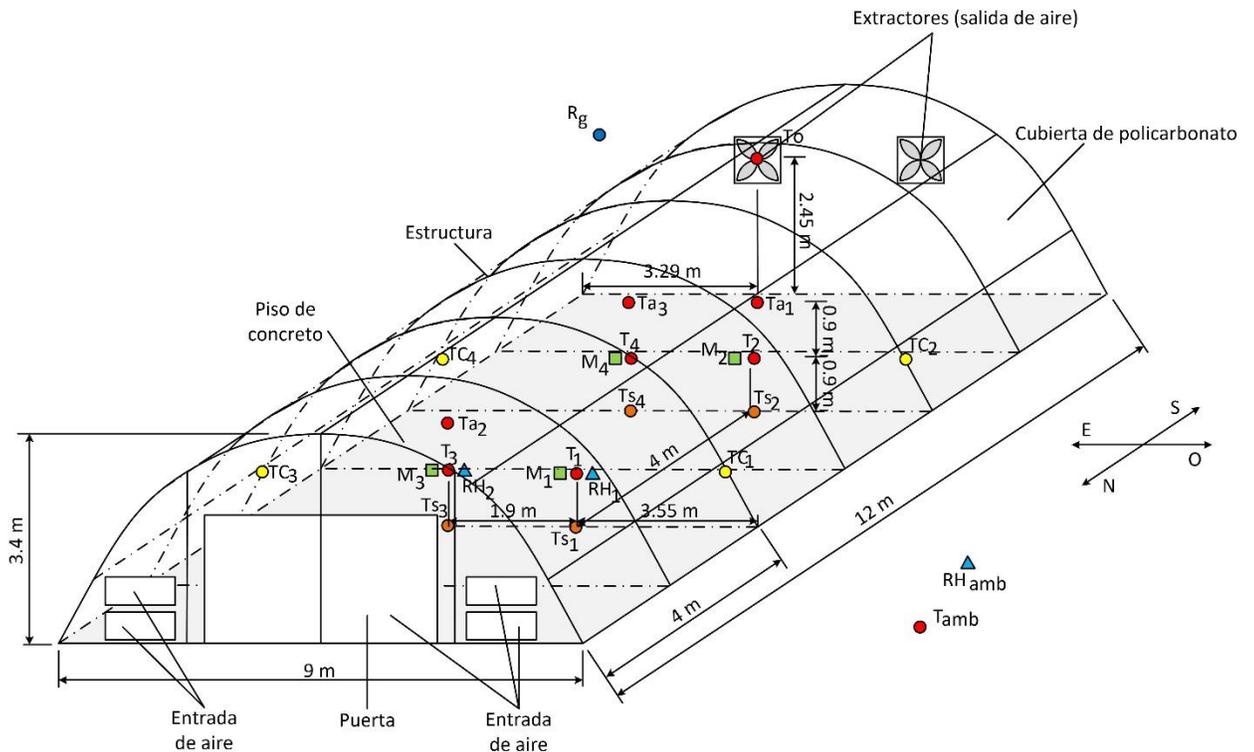


Figura 3. Distribución de puntos de medición para las variables temperatura del aire a la altura de las mesas (T), temperatura del aire 0.9 m arriba de las mesas (T_a), temperatura a la salida del secador (T_o), temperatura de la cubierta (T_c), temperatura del suelo (T_s), temperatura del producto (T_p), humedad relativa del

aire interior (RH), masa del producto (M), radiación solar global (R_g), temperatura ambiental (T_{amb}), humedad relativa del aire en el ambiente (RH_{amb}).

3.3.2.2 Evaluación del SSSTI sin producto

En la etapa experimental, se incluyeron dos pruebas para monitorear el comportamiento de la temperatura del aire en el interior del secador en vacío respecto a las condiciones climáticas exteriores. La variable monitoreada en el interior durante las pruebas fue la temperatura T (Figura 3), mientras que en el exterior se registró temperatura (T_{amb}) y radiación global (R_g).

La primera prueba se realizó del 25 al 27 de agosto del 2016, durante la cual se programó el termostato para controlar los extractores y mantener una temperatura máxima de 50 °C en el interior del secador. La segunda prueba se realizó del 26 al 28 de febrero del 2017, en este caso, los extractores se mantuvieron apagados todo el tiempo.

3.3.2.3 Evaluación del SSSTI con producto (Stevia)

Se realizaron dos experimentos de secado de *Stevia* (Figura 4), en ambos casos, se introdujeron 70 kg de producto al secador (incluyendo tallo y hoja). Los experimentos se realizaron el 22 y 24 de agosto de 2016 e iniciaron a las 10:30 y 11:00 am, respectivamente. Estos concluyeron cuando el producto alcanzó un peso constante. La temperatura de secado para la tercera prueba se estableció en un máximo de 45 °C, mientras que para el cuarto experimento fue de 50 °C. Ambas temperaturas se determinaron para las condiciones en las que la *Stevia* presenta un mayor contenido de edulcorante, las cuales, de acuerdo con Lemus-Mondaca *et al.* (2016) se encuentran en temperaturas de hasta 50 °C.



Figura 4. Deshidratado de *Stevia* en el sistema secador solar tipo invernadero construido en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

La pérdida de peso del producto en el tiempo se registró con cuatro muestras (M_1 , M_2 , M_3 , y M_4 , Figura 3), las cuales se pesaron en intervalos de 0.5 h utilizando una balanza digital modelo VE-1000 con una precisión de ± 0.01 g (Microscopios VELAB S. A. de C. V.). Para cada muestra se utilizaron 200 g de producto. Al finalizar, las muestras se utilizaron para determinar el porcentaje de materia seca mediante el método de la estufa (103 °C por 24 h).

El contenido de humedad en base húmeda M_{wb} (%) durante el proceso de secado, se determinó a partir del peso de las muestras en el tiempo y la materia seca final por medio de la siguiente ecuación (Nielsen, 2010):

$$M_{wb} = \left(\frac{W_0 - W_d}{W_0} \right) * 100\%$$

donde W_0 es el peso de la muestra húmeda (kg) y W_d es el peso de la muestra seca (kg).

De las mediciones realizadas por los sensores (Figura 3), las temperaturas T_1 a T_4 se promediaron para obtener el comportamiento a la altura de las mesas (T), los registros de Ta_1 a Ta_3 para obtener la temperatura 0.9 m por encima de la

mesas (Ta), los registros de Tp_1 a Tp_4 para obtener la temperatura del producto (Tp), los registros de Tc_1 a Tc_4 para obtener la temperatura de la cubierta (Tc), los registros de Ts_1 a Ts_4 para obtener la temperatura del suelo (Ts) y las mediciones de RH_1 y RH_2 para obtener la humedad relativa RH .

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 Comportamiento del SSSTI sin producto

Para el caso donde los extractores se mantuvieron en funcionamiento, la temperatura deseada ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) en el interior del SSSTI se alcanzó en promedio a las 10:30 horas y comenzó a disminuir alrededor de las 16:00 horas, por lo cual la temperatura máxima establecida en el interior se mantuvo en promedio 5.5 h al día durante las pruebas realizadas (Figura 5a). De acuerdo con Samsudin y Aziz (2013), las hojas de *Stevia* requieren de 5 a 6 h a una temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ para alcanzar una humedad cercana a 3.5%, los resultados obtenidos muestran que el SSSTI cumple con las condiciones necesarias para deshidratar *Stevia* en tan sólo un día. La radiación solar global tuvo máximos entre los 960 y 970 W m^{-2} , lo que propició que la temperatura en el interior del secador se incrementara de manera favorable durante las pruebas (Figura 5a).

En contraste, cuando los extractores se mantuvieron apagados, la temperatura en el interior del secador alcanzó valores máximos entre los 66 y $69\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto, a pesar de que la radiación global fue menor que en el caso anterior, alcanzando máximos aproximados de 840 W m^{-2} . Además, se puede observar que la diferencia entre la temperatura del aire interior y exterior llega a ser hasta de $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 5b). Los resultados obtenidos son similares a los de Lokeswaran y Eswaramoorthy (2013), quienes reportan una temperatura máxima alcanzada alrededor de los $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ para un secador solar tipo invernadero de convección natural. En otro trabajo, Kumar *et al.* (2013), reportaron temperaturas máximas de 40.6 y $41.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para un secador de convección natural y uno de convección forzada, respectivamente; las cuales están por debajo de los valores alcanzados en el presente estudio.

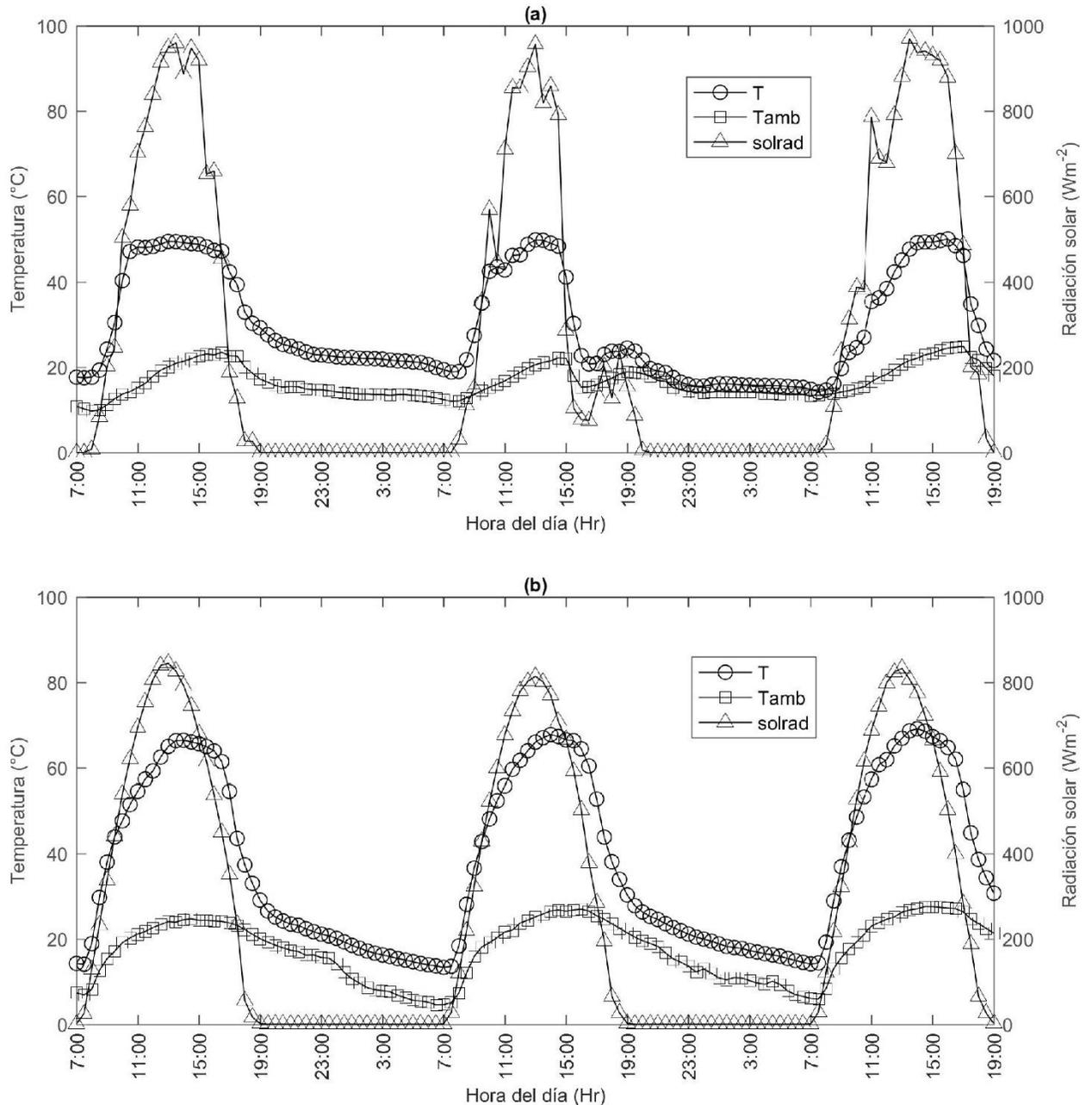


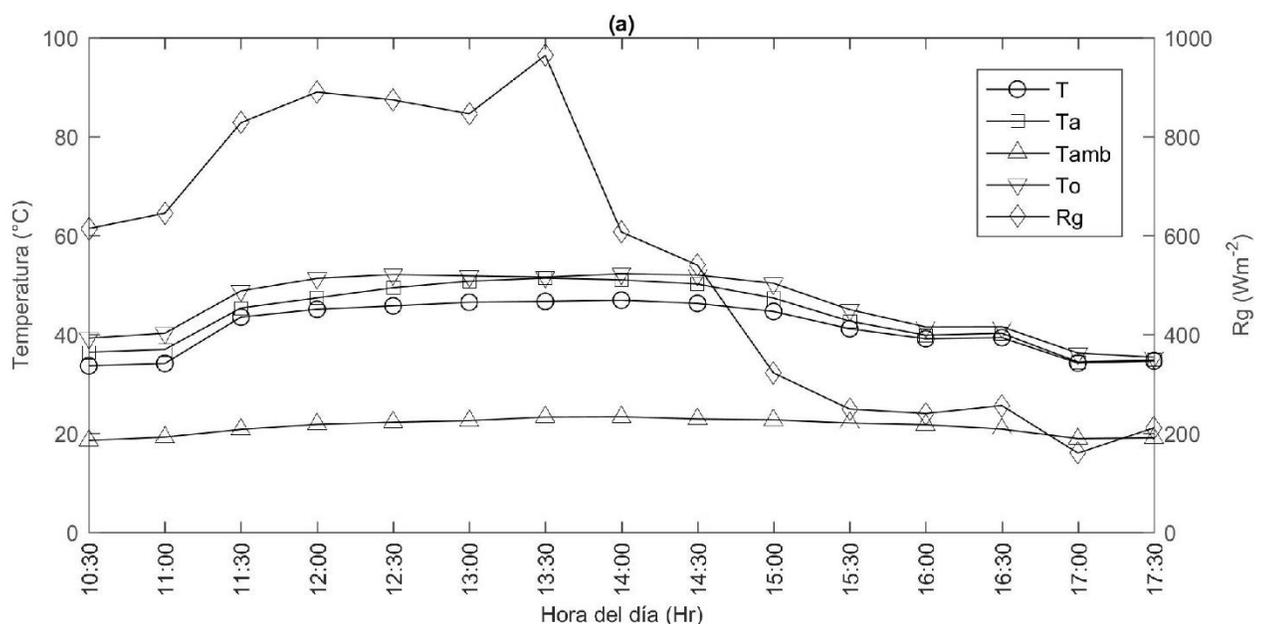
Figura 5. Radiación solar global (R_g) y temperatura en el interior (T) y exterior (T_{amb}) del SSSTI (a) Experimento uno: con extractores en funcionamiento; (b) Experimento dos: con extractores apagados.

3.4.2 Comportamiento del SSSTI en el deshidratado de *Stevia*

En el transcurso del experimento tres, la radiación solar en la mañana fue propicia para alcanzar la temperatura deseada (45 °C), sin embargo, alrededor de las

13:30 h, la radiación comenzó a disminuir debido a la nubosidad, a pesar de esto, la temperatura de 45 °C se mantuvo cerca de dos horas más (Figura 6a). Durante el cuarto experimento, se observó que la radiación solar fluctuó durante el día alcanzando un máximo de 840 W m^{-2} alrededor de las 14:00 horas, momento que el SSSTI alcanzó la temperatura deseada de 50 °C (Figura 6b). La variación de T_{amb} fue similar en ambos experimentos, lo que muestra que el comportamiento de la temperatura en el interior del secador tiene una dependencia mayor con la radiación global que con la temperatura del aire del externo, lo cual se debe a las características de transmisividad y transferencia de calor del material de la cubierta.

Los valores de las temperaturas T , T_a y T_o variaron respecto a la altura en ambos experimentos (Figura 6), esto indica que existe un gradiente vertical de temperatura que debe ser tomado en cuenta para definir la posición de los sensores (Figura 3) utilizados para el control del sistema, así como la altura adecuada de las charolas de secado.



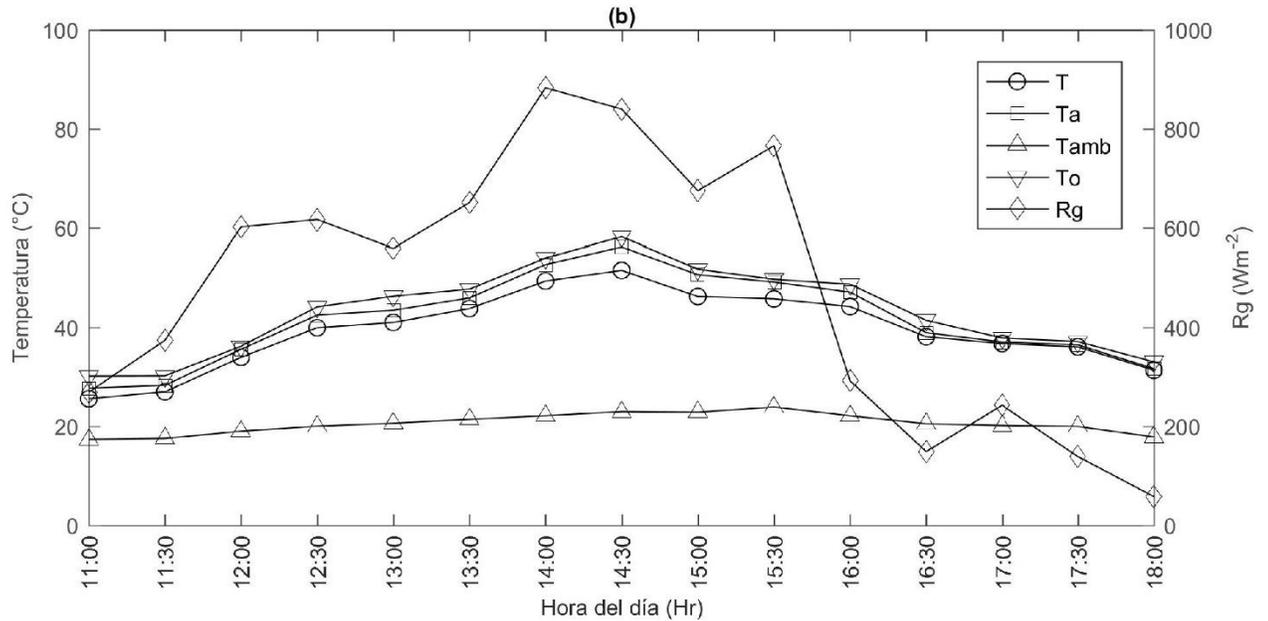


Figura 6. Radiación solar global y temperaturas en el interior y exterior del sistema secador solar tipo invernadero durante el deshidratado de *Stevia*, (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C). (T : Temperatura del aire a la altura de las mesas; T_a : Temperatura del aire 0.9 m arriba de las mesas; T_{amb} : Temperatura del ambiente; T_o : Temperatura del aire a la salida del secador; R_g : radiación solar).

Durante los experimentos tres y cuatro (Figuras 7a y 7b), se esperaba que el comportamiento de T_3 y T_4 difirieran del de T_1 y T_2 debido a que la radiación solar incide de forma más directa por el hemisferio Este durante la mañana y por el hemisferio Oeste durante la tarde, sin embargo, la diferencia más grande observada se dio en el experimento cuatro a las 14:30 horas (Figura 7b), donde la temperatura T_1 tenía un valor de 49.9 °C y la T_2 un valor de 53.3 °C. Con base en estos resultados, se puede afirmar que el proceso de secado de la *Stevia* fue uniforme en todo el secador, ya que la variación de las temperaturas a la altura de las mesas tuvo un máximo de 3.4 °C durante un tiempo aproximado de media hora, con lo cual, la temperatura de secado fue similar durante todo el proceso.

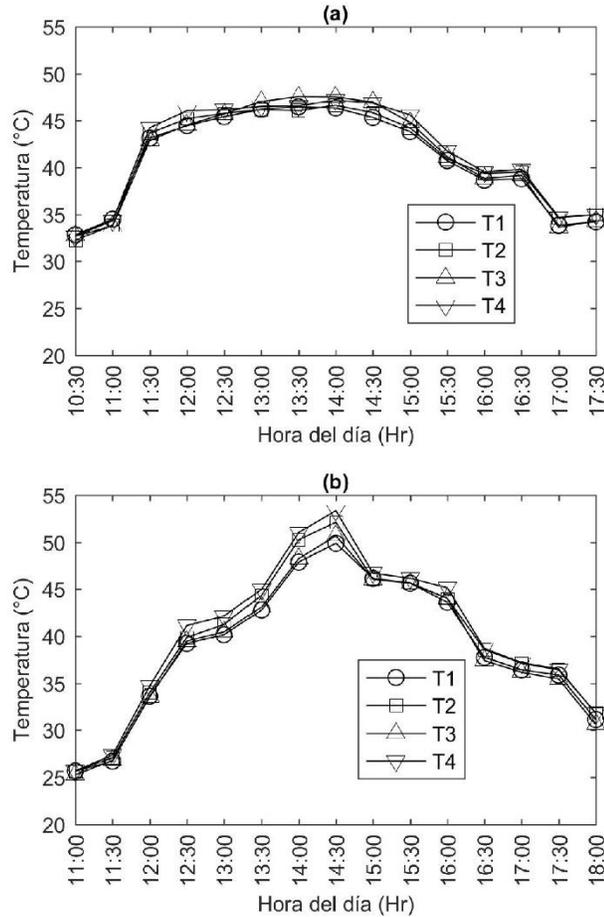


Figura 7. Temperatura del aire dentro del sistema secador solar tipo invernadero a la altura de las mesas durante el deshidratado de *Stevia* en los cuatro puntos mostrados en la Figura (3), (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C).

En los experimentos tres y cuatro se registró la variación de las temperaturas de la cubierta (T_c), suelo (T_s) y producto (T_p), (Figura 8a) y 8b). En general se observa que temperatura del producto (T_p) tiene un comportamiento similar a la temperatura del aire a su alrededor (Figura 6), con lo cual se resalta la importancia de que los sensores utilizados para retroalimentar el sistema de control de temperatura en el secador, deben colocarse en una posición cercana al producto. Para el caso de la T_s se observó que su valor es menor a T durante la mayor parte del proceso de secado, sin embargo, en la etapa final de ambos experimentos se puede ver que T_s es mayor a T en hasta 2 °C. Si las pruebas se prolongaran por más tiempo se esperaría una mayor diferencia entre estas dos

temperaturas, esto implicaría que la radiación solar incidente absorbida por la superficie del suelo serviría para calentar el aire en el SSSTI (Chen y Liu, 2006). En un proceso donde el tiempo de deshidratado fuera mayor que el de la *Stevia*, esto serviría para evitar que la temperatura del aire dentro del secador disminuya de manera drástica en ausencia de radiación solar.

La T_c , que se midió a la altura de las mesas de secado, es similar a la temperatura del aire a la misma altura (Figura 3). La diferencia más grande entre estas dos variables se observó en el experimento cuatro a las 14:00 horas, donde $T_c = 40.9$ y $T = 46.9$ °C, a esta misma hora, la T_{amb} tenía un valor de 23.3 °C. Esto significa que la película de aire dentro de la cubierta de policarbonato de doble hoja, cumple de manera eficiente su función de aislante.

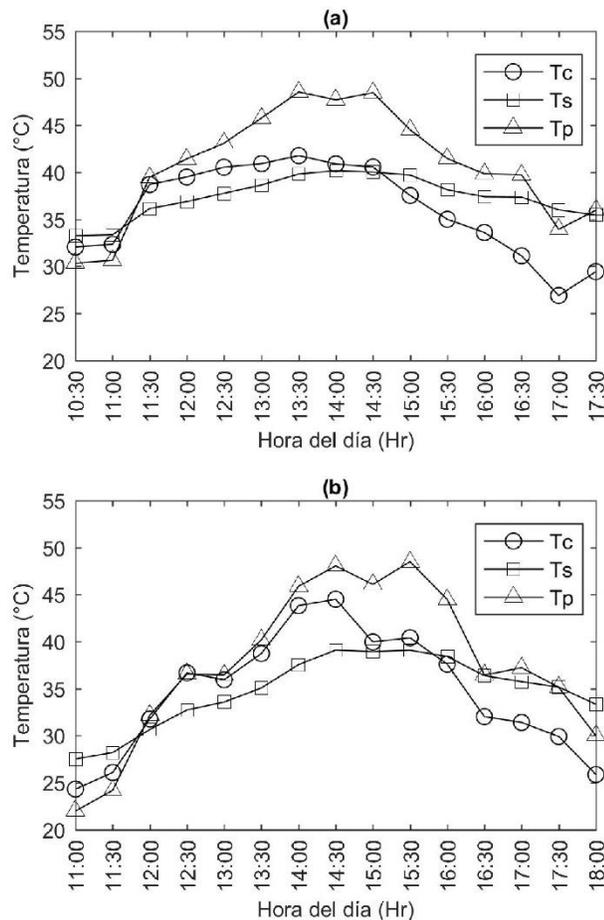


Figura 8. Temperaturas de la cubierta (T_c), suelo (T_s) y producto (T_p) durante el deshidratado de *Stevia* del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C).

En ambos experimentos de secado de *Stevia*, también se monitoreó el comportamiento de la humedad relativa en el interior y exterior del secador (Figura 9). Durante la tercer prueba (Figura 9a), RH_{in} varió entre 16.4 % y 45.3 % y RH_{amb} entre 52.4 % y 77.4%, mientras que en la prueba cuatro (Figura 9b), RH_{in} varió entre 28.8 % y 47.5% y RH_{amb} entre 49.5 % y 79.7 %. En ambos casos la humedad relativa en el interior del secador fue menor a la exterior, esto se debe a que el aumento de la temperatura dentro del SSSTI eleva la presión del vapor de saturación, lo que a su vez conduce a una reducción de la humedad relativa (Ajadi y Sanusi, 2013). De acuerdo con Taheri-Garavand *et al.* (2011), esto es de ayuda durante el proceso de secado, ya que, a baja humedad relativa del aire, la transferencia de calor y masa es elevada, por lo tanto, la pérdida de agua en el tiempo por parte del producto es mayor.

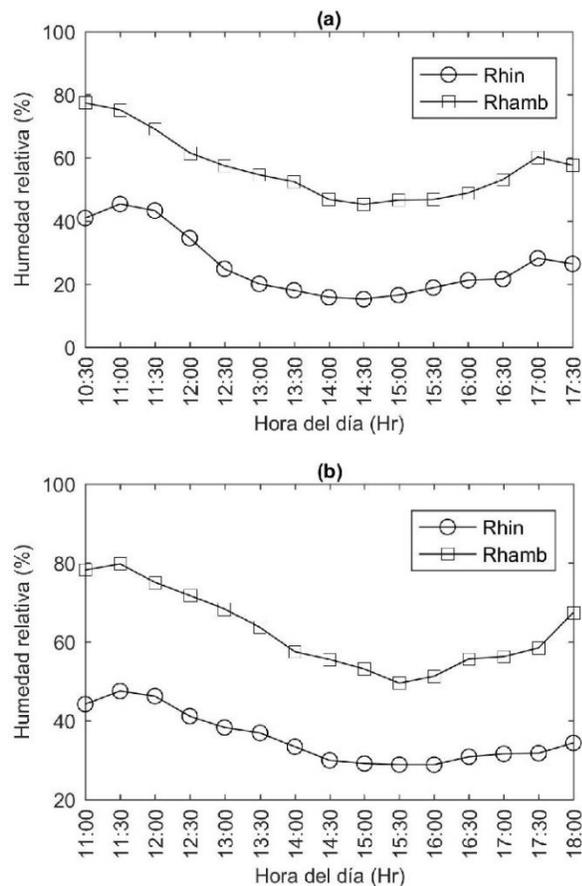


Figura 9. Humedad relativa en el interior (RH_{in}) y exterior (RH_{amb}) del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C).

En la prueba tres se observó que el producto redujo su M_{wb} del 81 a 12% en un tiempo de 6.5 h (Figura 10a), mientras que para la cuarta prueba el M_{wb} disminuyó de 80 a 13% en un tiempo de 6 h (Figura 10b). Tomando en cuenta que para la realización de los experimentos se incluyeron tanto tallos como hojas, ambos resultados son congruentes con los reportados por Samsudin y Aziz (2013), quienes trabajaron solo con hojas. Sin embargo, a pesar de que en la prueba cuatro se estableció una temperatura máxima de 50 °C, la cual es mayor que en la prueba tres (45 °C), sólo existió media hora de diferencia en el tiempo de secado. Esto se debe al comportamiento observado de la radiación global (Figura 6), donde se muestra que en el experimento tres, esta variable influyó de manera directa para alcanzar de manera más rápida la temperatura deseada, lo cual no sucedió en el experimento cuatro.

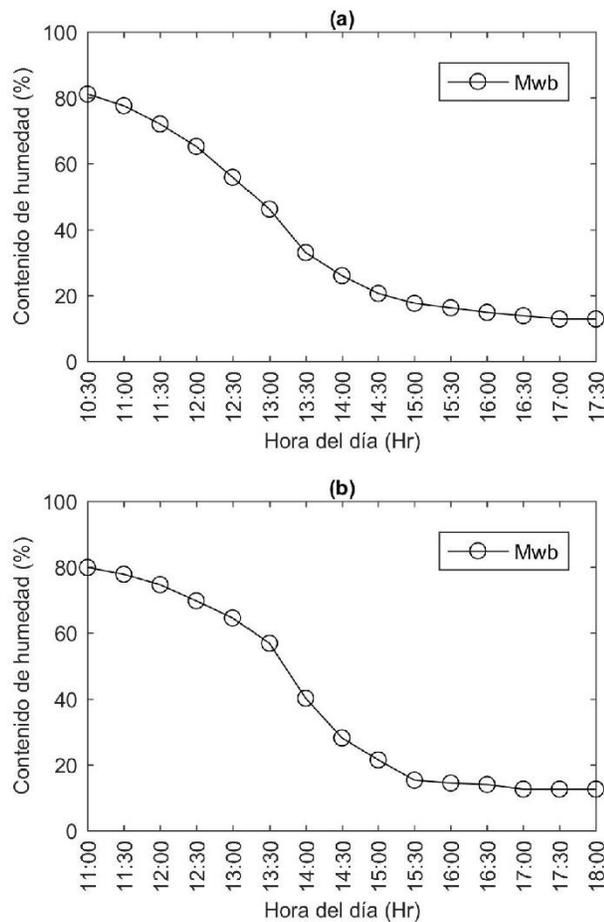


Figura 10. Curvas de secado de *Stevia* en el sistema secador solar tipo invernadero, (a) Experimento tres (45 °C); (b) Experimento cuatro (50 °C).

El secado de *Stevia* generalmente se realiza a la intemperie o en invernadero convencional. En invernadero, el proceso toma en promedio dos días en concretarse en condiciones de radiación solar alta y es posible llegar a tener pérdidas de hasta el 5% por humedecimiento y ennegrecimiento de hoja durante la noche. Durante la época de lluvias este problema se acentúa, pues el tiempo de secado dura de cuatro a cinco días y llegan a existir pérdidas de hasta un 70% del producto (De la Torre, 2016³) (Figura 11a). De las pruebas realizadas en este estudio, logró reducirse el tiempo de secado de la *Stevia* a cerca de 6 h, además no existieron pérdidas por humedecimiento de hoja (Figura 11b).



Figura 11. Calidad visual de deshidratado de *Stevia*. (a) En invernadero con cubierta de plástico y ventilación natural durante época de lluvia (De la Torre, S. 2016³); (b) En el sistema secador solar tipo invernadero construido en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

3.4.3 Tiempo y costos de construcción

El costo total del secador solar tipo invernadero fue de \$10,276.84 USD. Los gastos en cada etapa de la construcción, incluyendo el precio de los materiales y mano de obra son mostrados en un mismo concepto (Cuadro 1). Estos datos se

³ De la Torre, Sebastian. Productor de *Stevia* Totik (delatorreh12@hotmail.com)

tomaron de acuerdo con los precios del comercio local de la Ciudad de México en el año 2015. El tiempo empleado en realizar cada etapa incluye la mano de obra de cuatro trabajadores laborando en conjunto.

Cuadro 1. Costos y tiempo de construcción del secador solar tipo invernadero Chapingo, México.

Concepto	Costo \$(US)	Duración (d)
Cimentación y anclaje	2181.80	8
Fabricación y montaje de la estructura	1958.60	6
Montaje de cubierta de policarbonato	2954.54	2
Instalación de sistema de ventilación e iluminación	1363.70	4
Elaboración de mesas de secado	1818.20	5
Total	10,276.84	25

Fuentes-Salinas *et al.* (2003) reportaron los costos de construcción de un deshidratador tipo invernadero de techo plano para secar madera aserrada, el cual se construyó con un piso de concreto, cubierta de plástico y estructura de madera. Este secador tiene una superficie de 33 m² y un costo de construcción de \$5227.25 USD. El costo de construcción del secador en este trabajo es de casi el doble, sin embargo, se triplicó la superficie del deshidratador y se utilizaron materiales de mayor durabilidad en su construcción.

3.5 CONCLUSIONES

El sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica, es una alternativa para superar las desventajas presentes en invernaderos con cubierta de plástico y ventilación natural. El SSSTI construido permite alcanzar la temperatura necesaria para el deshidratado de *Stevia*, eliminando el problema de pérdidas por humedecimiento y ennegrecimiento de hojas que se presenta al deshidratar

en un invernadero. Además, el sistema de control logró mantener la temperatura deseada para el secado. Durante el proceso de deshidratado de *Stevia* la temperatura a la altura de las mesas fue homogénea, lo que propició que el secado fuera uniforme. Con el presente estudio, se logró proporcionar una alternativa al método de secado *Stevia* bajo invernadero, logrando reducir el tiempo de secado de dos días a un tiempo aproximado de 6 horas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. Sebastián de la Torre Hidalgo y a la empresa Totik por haber facilitado las muestras de *Stevia* necesarias para la realización de este trabajo.

3.6 LITERATURA CITADA

Ajadi, D. A., and Y. K. Sanusi. 2013. Effect of Relative Humidity on Oven Temperature of A Locally Design Solar Cabinet Dryer. GJSFR-A 13: 12-17.

Bala, B. K., and S. Janjai. 2013. Solar drying of agricultural products. Stewart Postharvest Rev. 9: 1-8.

Castañeda-Miranda. A., A. González-Parada., R. Guzmán-Cabrera, C., O. G. Ibarra-Manzano. 2012. Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. Acta Univ. 22: 14-19.

Castilla, N. 2013. Greenhouse technology and management. 2da. ed. CABI. 335 p.

Chen, W., and W. Liu. 2006. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a lean-to greenhouse. Renew Energy 31: 517-535.

Erell, E., V. Leal, and E. Maldonado. 2005. Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. Boundary Layer Meteorol. 114: 205-231.

FAO. 2015. Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. Boletín 2. 31 pp. <http://www.fao.org/3/I4655S.pdf>. (Consulta: Marzo 2017).

Fuentes-Salinas, M., D. Luna-Sánchez, J. Osorio-Suárez, y J. Corona-Islas. 2003. Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. Rev. Chapingo Ser. Cie. 9: 171-176.

Hernández, R. J., O. Martínez V., P. Quinto D., J. Cuevas D., R. Acosta O., J. O. Aguilar. 2010. Secado de chile habanero con energía solar. Rev. Iber. Tecnología Postcosecha 10: 120-127.

- Hossain, M. A., J. L. Woods, and B. K. Bala. 2005. Optimisation of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss. *Renew. Energy* 30: 729-742.
- Janjai, S., V. Khamvongsa, and B. K. Bala. 2007. Development, design, and performance of a PV-ventilated greenhouse dryer. *Int. Energ. J.* 8: 249-258.
- Janjai, S., N. Lamlert, P. Intawee, B. Mahayothee, B. K. Bala, M. Nagle, and J. Müller. 2009. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Sol. Energy* 83: 1550-1565.
- Janjai, S., P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, and V. Khamvongsa. 2011. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renew. Energy* 36: 1053-1062.
- Janjai, S., and B. K. Bala. 2012. Solar drying technology. *Food Eng. Rev.* 4: 16-54.
- Kumar, A., O. Prakash, A. Kaviti, and A. Tomar. 2013. Experimental analysis of greenhouse dryer in no-load conditions. *J. Environ. Res. Dev.* 7:1399–1406.
- Lemus-Mondaca, R., K. Ah-Hen, A. Vega-Gálvez, C. Honores, and N. O. Moraga. 2016. *Stevia rebaudiana* leaves: effect of drying process temperature on bioactive components, antioxidant capacity and natural sweeteners. *Plant Foods Hum. Nutr.* 71: 49-56.
- Lokeswaran, S., and M. Eswaramoorthy. 2013. An experimental analysis of a solar greenhouse drier: Computational Fluid Dynamics (CFD) Validation. *Energy Source Part A* 35: 2062-2071.
- Nielsen, S. S. 2010. *Food analysis*. 4th ed. Springer: New York. 550 p.
- Pangavhane, D. R., R. L. Sawhney, and P. N. Sarsavadia. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy* 27: 579-590.
- Prakash, O., V. Laguri, A. Pandey, A. Kumar, and A. Kumar. 2016. Review on various modelling techniques for the solar dryers. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 62: 396-417.
- Samsudin, A., and I. A. Aziz. 2013. Drying of *Stevia* leaves using laboratory and pilot scale dryers. *J. Trop. Agric. Food Sci.* 41: 137-147.
- Taheri-Garavand, A., S. Rafiee, and A. Keyhani. 2011. Effect of temperature, relative humidity and air velocity on drying kinetics and drying rate of basil leaves. *Electronic Journal of Environmental. J. Agric. Food Chem.* 10: 2075-2080.
- Yaldiz, O., C. Ertekin, and H. I. Uzun. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26: 457-465.

CAPÍTULO 4. COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO DURANTE EL DESHIDRATADO DE JITOMATE⁴

Angel Garduño-García¹; Irineo L. López-Cruz^{2*}; Alejandro Guerrero-Santana³;
Agustín Ruíz-García⁴

1, 2, 3, 4 Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, México. tel.: 01 595 952 1500 ext. 1551. (*Autor de correspondencia)

¹Correo-e: angel_g889@hotmail.com

²Correo-e: loci61@hotmail.com

³ Correo-e: gs.alejandro@icloud.com

⁴ Correo-e: aruiz@correo.chapingo.mx

4.1 RESUMEN

El método más utilizado para conservar productos agrícolas, y que puede ser aplicado al deshidratado de jitomate (*Solanum lycopersicum*), es el secado solar a la intemperie; pero, sin condiciones climáticas adecuadas las pérdidas de producto pueden ser graves. Los sistemas de secado solar son una alternativa que reducen las pérdidas y mejoran la calidad del producto en comparación con los métodos tradicionales. El objetivo del presente estudio fue evaluar el comportamiento de un secador solar durante el deshidratado de jitomate. El estudio se desarrolló en la Universidad Autónoma Chapingo, México. El sistema evaluado, tiene forma parabólica, cubierta de policarbonato, piso de concreto y extractores para controlar la temperatura. Su funcionamiento se evaluó mediante el monitoreo de la temperatura y humedad relativa en su interior respecto a las condiciones climáticas externas, así como las curvas de secado del producto. Las evaluaciones se realizaron mediante dos pruebas de deshidratado, donde la temperatura máxima del secador se mantuvo en 45 °C. En el primer experimento

⁴ Enviado a la Revista Mexicana de Ciencia Agrícolas (en revisión).

la eficiencia global del sistema fue de 23.6%, con una reducción del contenido de humedad del jitomate del 95 a 24% (bh) en un tiempo de 7 h. Mientras que en el segundo experimento la eficiencia global del sistema fue del 12.3%, con una reducción de la humedad del 94.81 al 16% (bh) en 19 h de sol acumuladas. El segundo experimento tuvo mayor duración debido a la presencia de nubosidad y lluvia durante la prueba. Finalmente, con los datos del experimento uno, se realizaron regresiones no-lineales para ajustar nueve diferentes modelos matemáticos de capa delgada.

Palabras claves: contenido de humedad, eficiencia del sistema secador solar, modelo de capa delgada.

4.2 Introducción

La superficie cosechada de tomate (verde y rojo) a nivel mundial creció a una tasa promedio anual de 1.7% entre 2004 y 2014, para ubicarse en cinco millones de hectáreas. En el mismo período, los rendimientos promedio crecieron a un ritmo de 1.2% promedio anual, al ubicarse en 2014 en 34 toneladas por hectárea (FIRA, 2017).

En México, la producción de tomate rojo creció a una tasa promedio anual de 4.8% entre 2006 y 2016, alcanzando un máximo histórico de 3.3 millones de toneladas. Durante ese mismo período, la superficie total destinada a este cultivo disminuyó a una tasa promedio anual de 2.5% (FIRA, 2017).

El tomate rojo generalmente se comercializa como fruto fresco, sin embargo, debido al alto contenido de agua que presenta (mayor al 90%) se convierte en un producto perecedero en el corto tiempo, por lo que surge la necesidad de buscar alternativas para prolongar su vida post-cosecha (Monsalve y Machado, 2007).

El método más utilizado para conservar productos agrícolas, y que puede ser aplicado al deshidratado de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*), es el secado a la intemperie, sin embargo, este proceso bajo condiciones climáticas hostiles conduce a pérdidas en la cantidad y calidad del producto (Pangavhane *et al.*, 2002). Estas pérdidas están relacionadas con la contaminación por suciedad, polvo e infestación por insectos, roedores y otros animales (Janjai y Bala, 2012; Prakash *et al.*, 2016).

Una alternativa es el uso de sistemas de secado solar con control del clima, lo cual puede reducir las pérdidas de cosechas y mejorar la calidad de productos deshidratados en comparación con métodos tradicionales (Yaldiz *et al.*, 2001; Kipping *et al.*, 2012; Colina-Irezabal, 2010). Uno de los sistemas de secado solar que destaca debido por su capacidad de procesamiento de producto, es el secador solar tipo invernadero (Janjai *et al.*, 2009).

El funcionamiento de los secadores solares está basado en el principio invernadero, donde la energía solar es atrapada mediante colectores que elevan la temperatura del fluido (aire), el cual realiza el proceso de secado, por lo que, la eficiencia de un sistema de secado habitualmente se expresa a través de diferentes parámetros tales como: eficiencia del secador, eficiencia del captador solar, tasa de extracción de humedad específica y capacidad evaporativa (Olguin y Durán, 2017).

El objetivo del presente estudio fue evaluar de manera experimental un secador solar tipo invernadero de forma parabólica, con cubierta de policarbonato y convección forzada, mediante pruebas de secado de jitomate.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Descripción del secador solar

El sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI) estudiado (Figura 1), se encuentra ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México (19°29' 'N, 98°53 O y a 2,250 m de altitud). El SSSTI está orientado en la dirección norte-sur y tiene dimensiones de 9 x 12 m de base por 3.4 m de altura, asimismo cuenta con una superficie interior de 108 m² y un volumen aproximado de 211 m³. La estructura es de acero galvanizado, la cubierta es de policarbonato de doble pared de 6 mm de ancho y el piso es de concreto con un espesor de 0.15 m. El secador cuenta con cuatro entradas de aire de 1.23 m de ancho por 0.53 m de alto y una más (puerta) de 2 x 2 m, todas forradas con malla antiáfidos de 40 x 26 hilos. En la pared sur se encuentran instalados dos extractores con una capacidad de 9,435 m³ h⁻¹ cada uno, los cuales son accionados mediante

motores monofásicos de 0.5 HP (373 W) y permiten una renovación del aire en el interior del secador en un tiempo aproximado de 40 s. En el interior del SSSTI se encuentran instaladas 24 mesas con charolas 1.8 x 1.5 m, obteniendo así una superficie útil de secado de 64.8 m².



Figura 1. Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica y cubierta de policarbonato ubicado en Chapingo, México.

4.3.2 Experimentos de secado

Se realizaron dos experimentos de secado de jitomate (Figura 2), en ambos casos, se usó 90 kg de producto. Los frutos de jitomate se lavaron y se rebanaron en rodajas de 5 mm de espesor, para posteriormente acomodarlo en una capa fina sobre mesas de secado de un solo nivel para facilitar la carga y descarga. Los experimentos se realizaron el 31 de agosto y 3 de septiembre de 2016 e iniciaron a las 10:00 y 9:00 am, respectivamente. Estos concluyeron cuando el producto alcanzó un peso aproximadamente constante. La temperatura de secado para ambas pruebas se estableció en un máximo de 45 °C, tomando como referencia que es precisamente el rango de 45 a 55 °C donde el jitomate conserva de manera favorable nutrientes, vitaminas, sabor y color (Andritsos *et al.*, 2003). Sin embargo, algunos autores reportan que la máxima temperatura para deshidratar tomate es de 60°C (Prakash y Kumar, 2014 citando a Sharma *et al.*, 2009; Prakash *et al.*, 2016).



Figura 2. Deshidratado de jitomate en el sistema secador solar tipo invernadero ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

La pérdida de peso del producto en el tiempo se registró con cuatro muestras (M_1 , M_2 , M_3 , y M_4 , Figura 3), las cuales se pesaron en intervalos de 0.5 h utilizando una balanza digital modelo VE-1000 con una precisión de ± 0.01 g (Microscopios VELAB S. A. de C. V.). Para cada muestra se utilizaron 400 g de producto. Al finalizar, las muestras se utilizaron para determinar el porcentaje de materia seca mediante el método de la estufa ($103\text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h). El contenido de humedad en base húmeda M_{wb} (%) durante el proceso de secado, se determinó a partir del peso de las muestras en el tiempo y la materia seca final por medio de la siguiente ecuación (Nielsen, 2010):

$$M_{wb} = \left(\frac{W_0 - W_d}{W_0} \right) * 100\%$$

donde W_0 es el peso de la muestra húmeda (kg) y W_d es el peso de la muestra seca (kg).

La eficiencia del sistema secador solar se obtuvo con la ecuación (Lingayat *et al.*, 2017; Iriarte *et al.*, 2013):

$$\eta_{SSSTI} = \frac{m_w L_v}{A_c I t + P}$$

donde m_w es el peso de agua evaporada del producto (kg), L_v es el calor latente de vaporización del agua (kJ/kg), A_c es el área del colector (m^2), I es la radiación solar (W/m^2), t es el tiempo (h) y P es la energía consumida por los ventiladores (kJ).

Con los datos obtenidos del experimento uno, se realizaron regresiones no-lineales para ajustar 9 modelos de capa delgada (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos de curva de secado de capa delgada comúnmente utilizados (Sacilik *et al.* 2006).

No.	Nombre del modelo	Modelo
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	De dos términos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
6	De dos términos exponenciales	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
7	Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Aproximación por difusión	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
9	Henderson y Pabis modificado	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$

La razón de humedad para el ajuste de los modelos se expresó como (Sacilik *et al.* 2006):

$$MR = \frac{M}{M_0}$$

donde M es el contenido de humedad en cualquier tiempo (kg de agua/kg de materia seca) y M_0 es el contenido de humedad inicial (kg de agua/kg de materia seca).

Las estadísticas de ajuste utilizadas para evaluar el desempeño de los modelos con los parámetros estimados en las regresiones fueron: el error absoluto promedio (*MAE*), la raíz cuadra del error cuadrático medio (*RMSE*) y la eficiencia (*EF*) de modelación. Las estadísticas se calculan de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i)^2}; \quad MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_i|; \quad EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2}$$

donde $D_i = MR_{exp,i} - MR_{pre,i}$, MR_{exp} es la razón de humedad experimental (kg de agua/kg de materia seca), MR_{pre} la razón de humedad predicha por el modelo (kg de agua/kg de materia seca) y \overline{MR}_{exp} es el promedio de las razones de humedad experimentales (kg de agua/kg de materia seca).

4.3.4 Mediciones y sistema de registro de datos

Los puntos de medición durante los experimentos se distribuyeron en todo el volumen del secador (Figura 3). La temperatura del aire a la altura de las mesas (T , °C), temperatura del aire 0.9 m por encima de las mesas (T_a , °C) y temperatura del aire de salida (T_o , °C) se monitorearon mediante sensores 108-L (Campbell Scientific Inc., EE.UU). Las temperaturas del suelo (T_s), cubierta (T_c , °C) y producto (T_p , °C), se midieron con sensores infrarrojos MLX90614, mientras que la humedad relativa del aire en el interior (RH_1 , %, y RH_2 , %) se monitoreo con sensores HMP50 (Campbell Scientific Inc., EE.UU). La temperatura (T_{amb} , °C) y humedad relativa del aire exterior (RH_{amb} , %) se registró con una estación meteorológica HOBO U30 (Onset Computer Corporation, EE.UU). Las señales generadas por lo sensores se almacenaron y promediaron cada 30 minutos para su posterior análisis. Durante el proceso de recolección de datos, los sensores se protegieron de la radiación solar mediante tubos horizontales de 0.5 m de longitud recubiertos de aluminio (Erell *et al.*, 2005). Los datos de la radiación global se tomaron de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo.

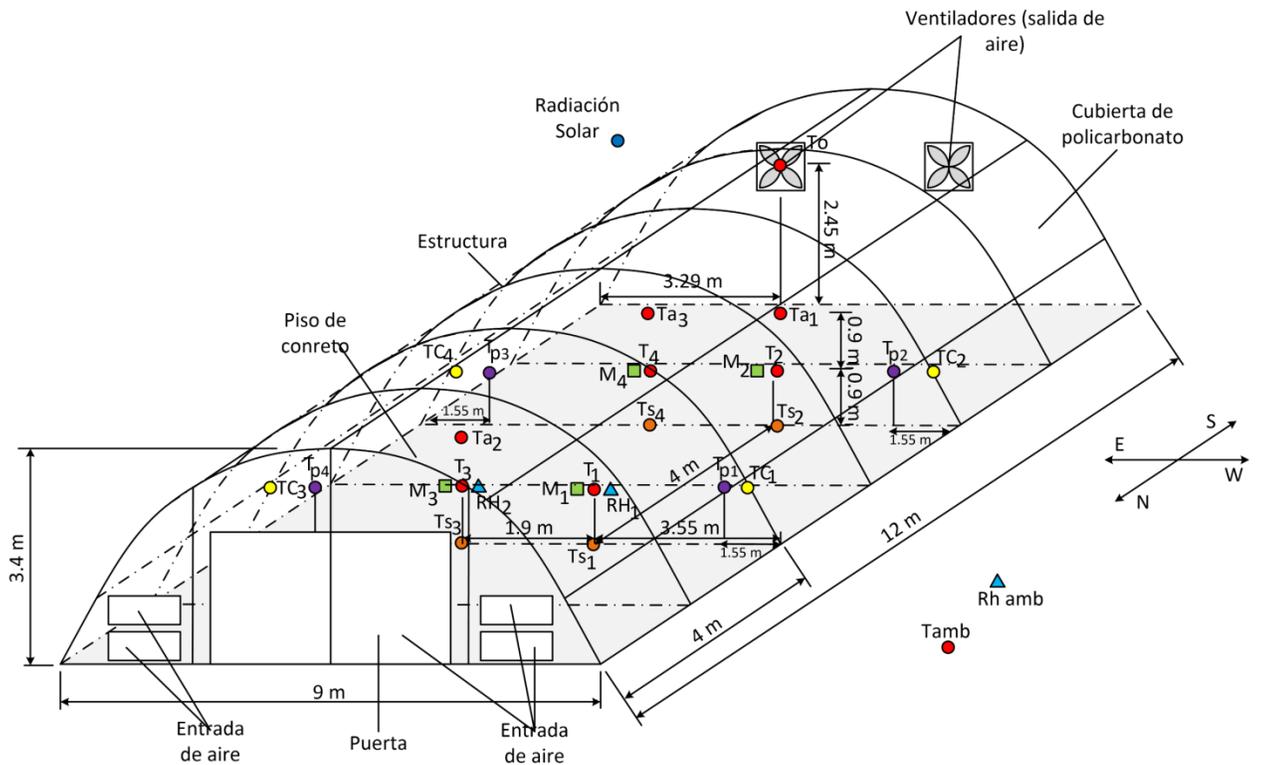


Figura 3. Distribución de puntos de medición para las variables temperatura del aire a la altura de las mesas (T), temperatura del aire 0.9 m arriba de las mesas (T_a), temperatura a la salida del secador (T_o), temperatura de la cubierta (T_c), temperatura del suelo (T_s), temperatura del producto (T_p), humedad relativa del aire interior (RH), masa del producto (M), radiación solar global (R_g), temperatura ambiental (T_{amb}), humedad relativa del aire en el ambiente (RH_{amb}).

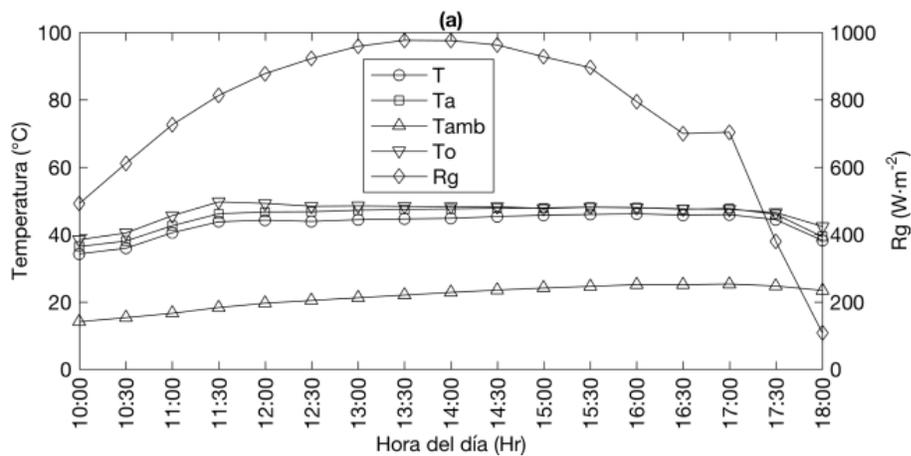
De las mediciones realizadas por los sensores (Figura 3), las temperaturas T_1 a T_4 se promediaron para obtener el comportamiento a la altura de las mesas (T), los registros de T_{a1} a T_{a3} para obtener la temperatura 0.9 m por encima de las mesas (T_a), los registros de T_{p1} a T_{p4} para obtener la temperatura del producto (T_p), los registros de T_{c1} a T_{c4} para obtener la temperatura de la cubierta (T_c), los registros de T_{s1} a T_{s4} para obtener la temperatura del suelo (T_s) y las mediciones de RH_1 y RH_2 para obtener la humedad relativa RH .

4.4 Resultados y discusión

El primer experimento de deshidratado de jitomate realizado el 1 de agosto de 2016, inició a las 10:00 horas y concluyó a las 18:00 horas, es decir, cuando el producto alcanzó un peso aproximadamente constante entre mediciones. La temperatura máxima deseada ($T=45$ °C) en el interior del SSSTI se alcanzó en

promedio a las 12:00 horas y comenzó a disminuir alrededor de las 17:30 horas, por lo cual dicha temperatura se mantuvo alrededor de 5.5 h durante la prueba de secado (Figura 4a). En el experimento se observó que la radiación solar global (R_g) se comportó de manera favorable, logrando un pico máximo 977 W m^{-2} , esto ayudó a que la temperatura en el interior del secador se mantuviera en el valor deseado (Figura 4a).

Por otro lado, el experimento dos inició el 3 de septiembre de 2016 a las 9:00 h y concluyó el 4 de septiembre de 2016 a las 17:00 h. Esto se debe a que existió nubosidad e incluso lluvia, por lo cual la radiación R_g se mantuvo fluctuando durante la realización de la prueba, alcanzando un pico máximo de 781 W m^{-2} durante el primer día (Figura 4b) y un pico máximo de 714 W m^{-2} durante el segundo día (Figura 4c). Por esta razón, la temperatura máxima deseada ($T=45 \text{ }^\circ\text{C}$) sólo se mantuvo durante alrededor de 3 h del tiempo total que duró el experimento.



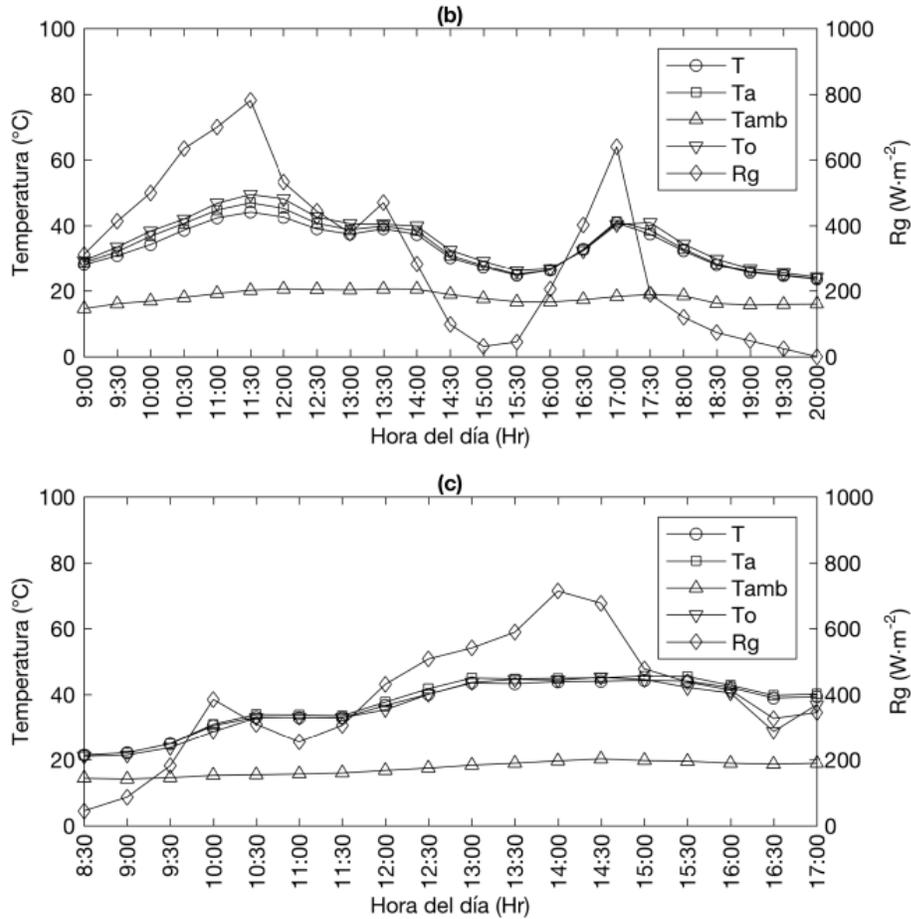


Figura 4. Radiación solar global y temperaturas en el interior y exterior del sistema secador solar tipo invernadero durante el deshidratado de jitomate, (a) Experimento uno; (b) experimento dos, día uno; (c) experimento dos, días dos. (T : Temperatura del aire a la altura de las mesas; T_a : Temperatura del aire 0.9 m arriba de las mesas; T_{amb} : Temperatura del ambiente; T_o : Temperatura del aire a la salida del secador; R_g : radiación solar).

La variación de T_{amb} (Figura 4) fue similar en ambos experimentos, lo que muestra que el comportamiento de la temperatura en el interior del secador tiene una dependencia mayor con la radiación global que con la temperatura del aire del externo, lo cual se debe a la baja transferencia de calor con el aire del ambiente por la presencia de la cubierta. Los valores de las temperaturas T , T_a y T_o variaron respecto a la altura en ambos experimentos (Figura 4), esto indica que existe un gradiente vertical de temperatura que debe ser tomado en cuenta

a la hora de definir la altura de las mesas de secado, o bien, en el caso de un sistema de control para definir la posición de los sensores.

En ambos experimentos se registró la variación de las temperaturas de la cubierta (T_c), suelo (T_s) y producto (T_p), (Figura 5a, 5b y 5c). En general, para las dos pruebas se observa que la temperatura del producto (T_p) tiene un comportamiento similar a la temperatura del aire (T) a su alrededor (Figura 4), con lo cual se resalta la importancia de que los sensores utilizados para retroalimentar el sistema de control de temperatura en el secador, deben colocarse en una posición cercana al producto. Para el caso de la T_s se observó que su valor es menor a T durante la mayor parte del proceso de secado, sin embargo, a las 18:00 h tanto del experimento uno, como del primer día del experimento dos se puede ver que T comienza a decrecer más rápido que T_s , llegando a ser menor. Este comportamiento evita que la temperatura del aire dentro del secador disminuya de manera drástica en ausencia de radiación solar, ya que la energía absorbida por la superficie del suelo ayuda a calentar el aire en el SSSTI (Chen y Liu, 2006).

La T_c (Figura 5), que se midió a la altura de las mesas de secado, es similar a la temperatura del aire a la misma altura (Figura 4). La diferencia entre estas variables en promedio fue de 4.44 °C para el experimento uno y de 5 °C para el experimento dos, esto ocurrió a pesar de que la diferencia promedio entre T y T_{amb} fue de 21.64 °C para el experimento uno y de 17.02 °C para el experimento dos. La temperatura de la cubierta en el interior se asemejó más a la temperatura del aire dentro del secador debido a la película de aire del policarbonato de doble hoja, la cual funciona como aislante.

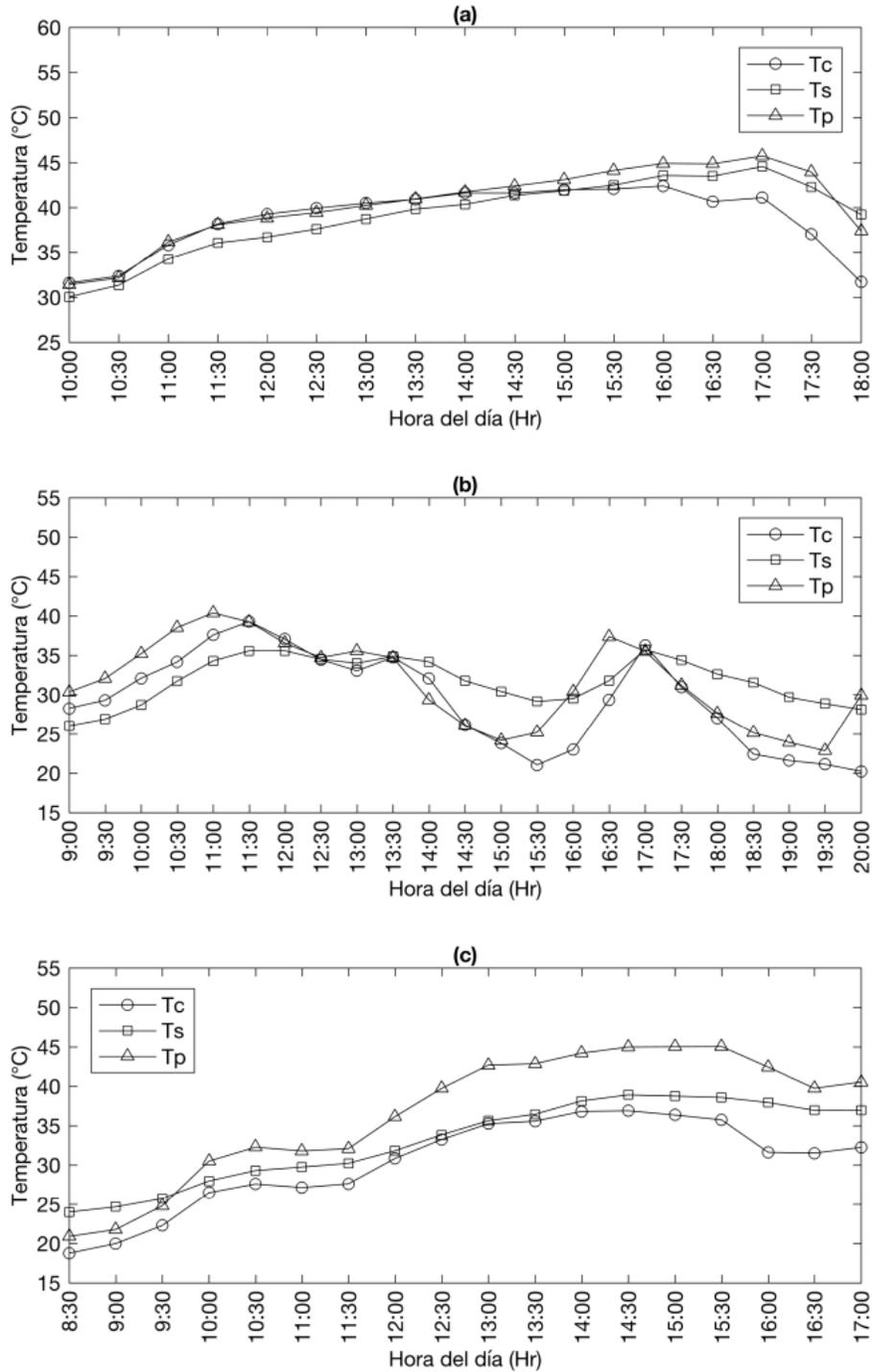
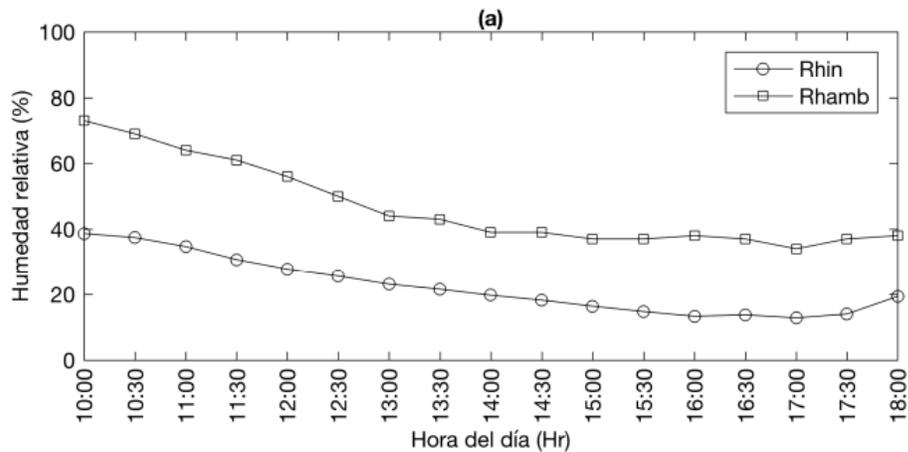


Figura 5. Temperaturas de la cubierta (T_c), suelo (T_s) y producto (T_p) durante el deshidratado de jitomate del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento uno; (b) experimento dos, día uno; (c) experimento dos, días dos.

En ambos experimentos de secado de jitomate, también se midió el comportamiento de la humedad relativa en el interior y exterior del secador (Figura 6). Durante la prueba uno (Figura 6a), RH_{in} varió entre 12.9 % y 38.6 % y RH_{amb} entre 34.9 % y 73 %, mientras que en la prueba dos en el primer día (Figura 6b), RH_{in} varió entre 58 % y 76.8 % y RH_{amb} entre 57.2 % y 87.3 %, mientras que en el segundo día del experimento dos (Figura 6c), RH_{in} varió entre 20.6 % y 76.3 % y RH_{amb} entre 64.1 % y 100 %. En ambos casos la humedad relativa en el interior del secador fue menor a la exterior, esto se debe a que el aumento de la temperatura dentro del SSSTI eleva la presión del vapor de saturación, lo que a su vez conduce a una reducción de la humedad relativa (Ajadi y Sanusi, 2013). De acuerdo con Taheri-Garavand *et al.* (2011), esto es de ayuda durante el proceso de secado, ya que, a baja humedad relativa del aire, la transferencia de calor y masa es elevada, por lo tanto, la pérdida de agua en el tiempo por parte del producto es mayor.



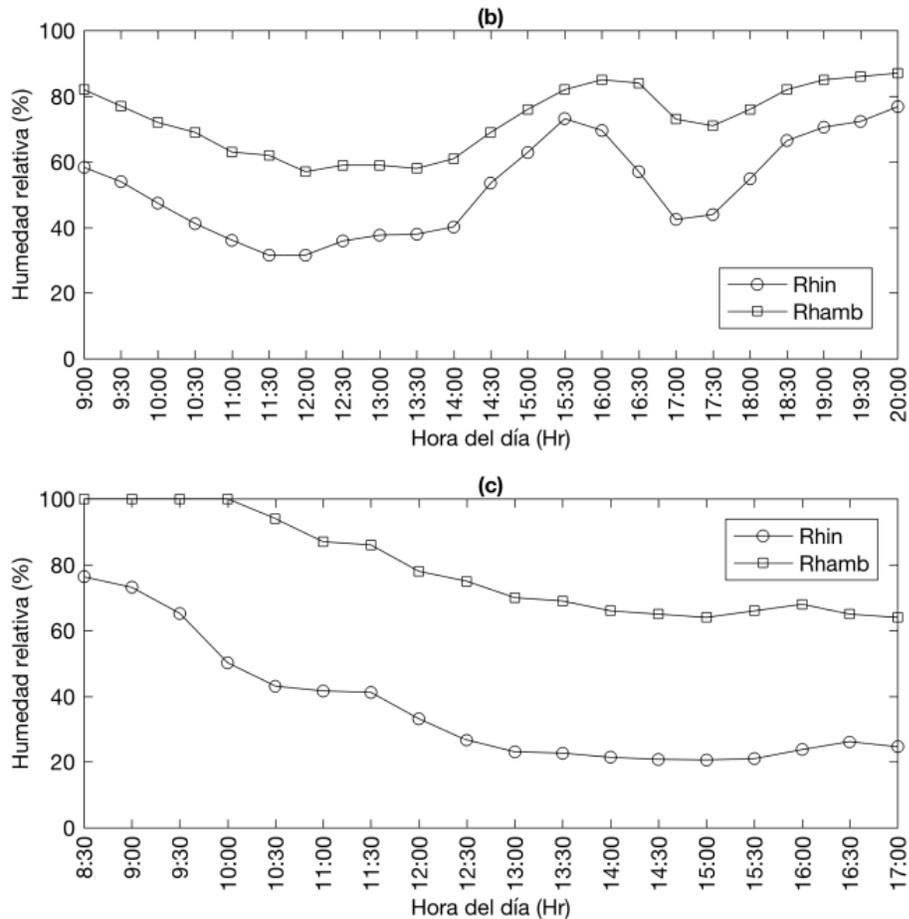
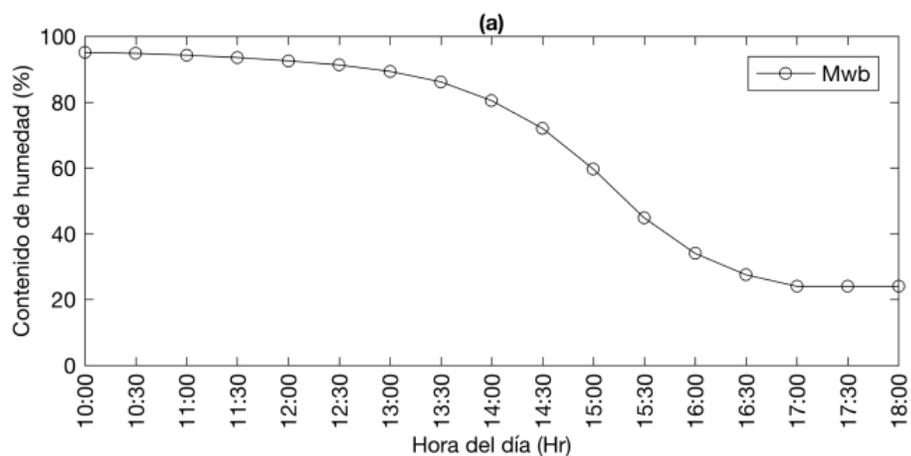


Figura 6. Humedad relativa en el interior (RH_{in}) y exterior (RH_{amb}) del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento uno; (b) experimento dos, día uno; (c) experimento dos, días dos.

En la prueba uno se observó que el producto redujo su M_{wb} del 95 a 24 % (bh) en un tiempo de 7 h (Figura 7a). Este resultado es similar al obtenido por Arun *et al.* (2014), quienes realizaron un experimento de deshidratado de jitomate en un secador solar tipo invernadero en forma de túnel, el cual duró dos días, logrando reducir el contenido de humedad del producto del 90 a 40 % (bh) en el primer día, donde la temperatura fluctuó entre 31 y 39 °C, mientras que en el segundo día la humedad del producto se redujo del 40 al 9 % (bh), teniendo un pico en la temperatura de 67 °C. En el experimento dos se logró reducir el contenido de humedad del producto del 94.81 al 16 % (bh) en 19 h de sol acumuladas (Figuras 7b y 7c). El tiempo de secado fue mayor en esta última prueba debido a que se

presentó nubosidad y lluvia durante el experimento. Además, es importante resaltar que dado el que el producto se dejó en el secador durante la noche, su humedad se redujo del 75.07 al 61.05 % (bh), ya que como se mencionó antes, la energía absorbida por la superficie del suelo durante el día ayudó a calentar el aire en el SSSTI en ausencia de radiación. En el segundo experimento se obtuvo un tiempo de deshidratado más rápido que el reportado por Janjai (2012), quien realizó un experimento de secado de jitomate, el cual tuvo un pretratamiento mediante deshidratado osmótico, para posteriormente introducirlo a un secador solar, donde se redujo el contenido de humedad del 54 al 15 % (bh) en un periodo de cuatro días. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que Janjai (2012) deshidrató 1 000 kg de producto en un secador cuya área es de 160 m², mientras que en el presente trabajo se introdujeron 90 kg de producto en un secador con un área de 108 m².



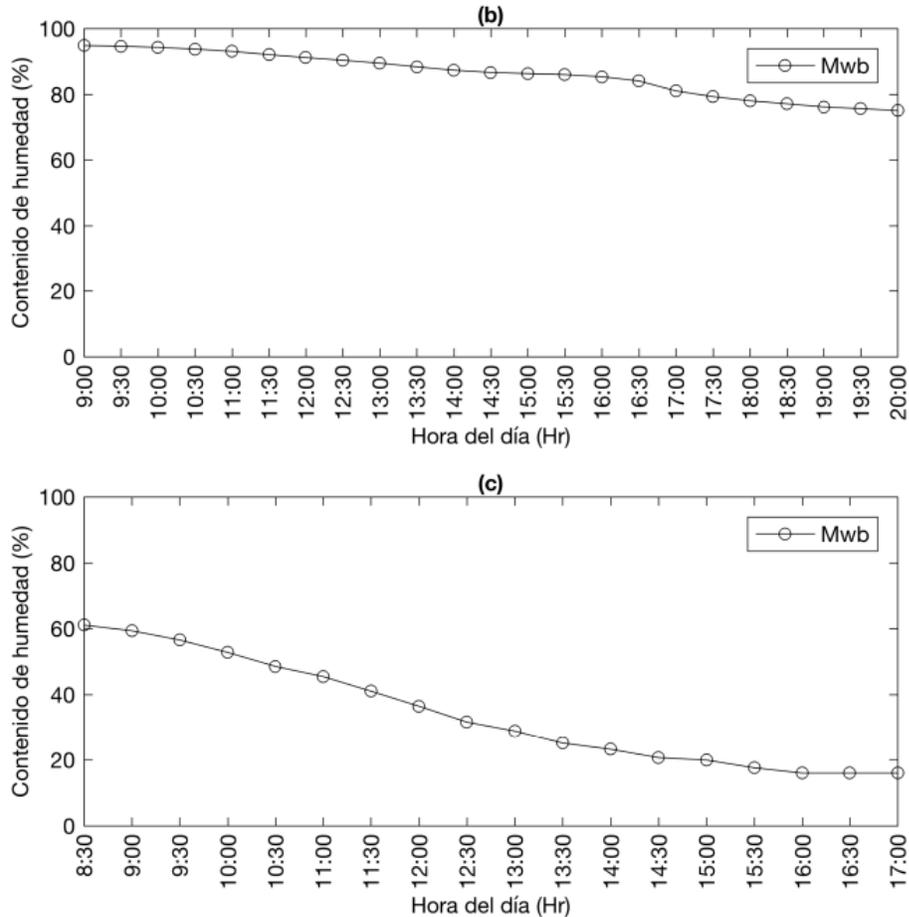


Figura 7. Curvas de secado de jitomate en el sistema secador solar tipo invernadero, (a) Experimento uno; (b) experimento dos, día uno; (c) experimento dos, días dos.

La eficiencia global del SSSTI durante el primer experimento fue de 23.6%, con un máximo de 36.3% durante las primeras horas de secado y un mínimo de 1% al concluir el mismo. La baja eficiencia al final de la prueba se debe a que el contenido de humedad del producto disminuye a una tasa menor en la etapa final del secado. En el segundo experimento, la eficiencia global fue de 12.3%, con un máximo de 43.6% y un mínimo de 1%. En este caso se alcanzó una eficiencia máxima mayor que la del primer experimento debido a que el producto continuaba deshidratándose a pesar de la baja radiación solar por la presencia de nubosidad. Los valores de eficiencia globales encontrados en este trabajo son cercanos a los reportados por Hossain *et al.* (2013), quienes construyeron y

evaluaron un secador híbrido para deshidratado de jitomate cuya eficiencia varió entre el 17.73 y 29.35% (funcionando únicamente con energía solar).

El Cuadro 2, muestra los coeficientes de los modelos de secado y las estadísticas utilizadas para comparar el ajuste de cada modelo con los datos experimentales. Los valores de *MAE*, *RMSE* y *EF* variaron de 0.0174 a 0.0814, 0.0205 a 0.0897 y 0.9331 a 0.9965, respectivamente. A partir de los resultados anteriores, se puede inferir que el modelo de Page es el que mejor representa el comportamiento del secado de jitomate en SSSTI.

Cuadro 2. Parámetros estimados y estadísticas de ajuste de los modelos evaluados.

Modelo no.	Coeficientes y constantes del modelo	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>EF</i>
1	$k = 0.3378$	0.0814	0.0897	0.9331
2	$k = 0.1349; n = 1.751$	0.0174	0.0205	0.9965
3	$a = 1.132; k = 0.3773$	0.0700	0.0770	0.9507
4	$a = 1.34; c = -0.2601; k = 0.2355$	0.0458	0.0517	0.9778
5	$a = -19; b = 19.97; k_0 = 0.7718; k_1 = 0.727$	0.0290	0.0335	0.9907
6	$a = 2.109; k = 0.5461$	0.0337	0.0390	0.9873
7	$a = -0.2451; b = 0.01468$	0.0408	0.0468	0.9818
8	$a = -99.8; b = 1.003; k = 0.2563$	0.0744	0.0837	0.9417
9	$a = -4.683; b = -0.1241; c = 5.827; g = 4.82; h = 0.1814; k = 0.1502$	0.0365	0.0410	0.9860

En la Figura 8a, se muestran las variaciones de las razones de humedad experimentales y las predichas mediante el modelo de Page con respecto al tiempo. En la figura 8b, se realiza una comparación, mediante una gráfica 1:1, entre las razones de humedad experimentales y las predichas por el modelo de

Page. Como puede observarse, el modelo predice de manera eficiente el comportamiento del secado de jitomate en el SSSTI.

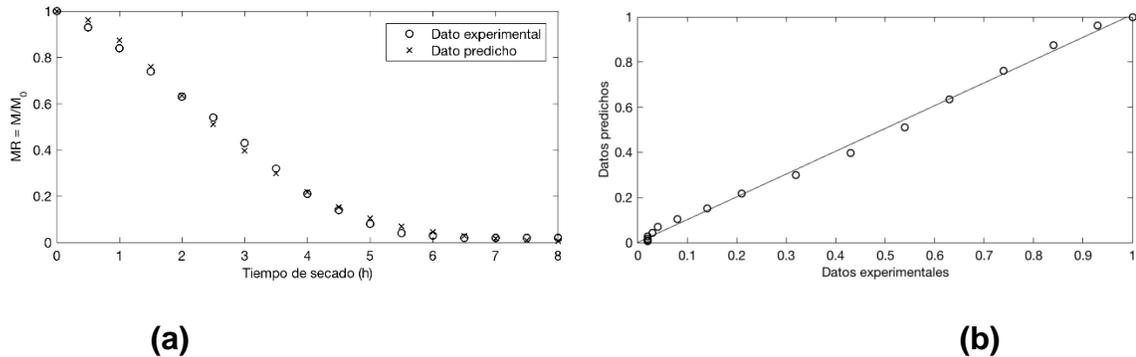


Figura 8. (a) variaciones de las razones de humedad experimentales y las predichas mediante el modelo de Page con respecto al tiempo. (b) Comparación entre las razones de humedad experimentales y las predichas por el modelo de Page.

De acuerdo con Moreno *et al.* (2014), una forma de evaluar el jitomate deshidratado es mediante la caracterización de sus propiedades físico-químicas (pH, sólidos solubles, humedad, actividad de agua, color, sabor) y parámetros microbiológicos (mesófilos, coliformes, hongos y levaduras). Sin embargo, en este trabajo sólo se realizó la comparación visual entre el jitomate fresco (Figura 8a) y el deshidratado (Figura 8b), donde se observó que no existe gran diferencia en el color. Por otro lado, comparando con el producto obtenido por Arun *et al.* (2014), visualmente, el jitomate deshidratado en este trabajo presenta una mejor calidad.



Figura 9. Calidad visual de del jitomate deshidratado en el sistema secador solar tipo invernadero ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

4.5 Conclusiones

El sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica permite alcanzar la temperatura necesaria para el secado de jitomate, eliminando el problema de pérdidas del producto que se presentan al deshidratar a la intemperie. En este trabajo, el sistema de control mantuvo la temperatura máxima para el secado en 45 °C, pero, de ser necesario es posible incrementar el valor de esta temperatura máxima permitida, y con ello acelerar el proceso de secado, sin embargo, se debe tener cuidado de no dañar la propiedades visuales y nutrimentales del producto.

En el interior del secador se tiene un gradiente vertical de temperatura, el cual se debe tomar en cuenta a la hora de definir la altura de las charolas de secado, así como la ubicación de los sensores utilizados para retroalimentar la información captada por el sistema de control.

En ambos experimentos la humedad relativa en el interior del secador fue menor a la exterior. Esto ayudó durante el proceso de secado, ya que, a baja humedad relativa del aire, la transferencia de calor y masa es elevada, por lo tanto, la pérdida de agua en el tiempo por parte del producto es mayor (Colina-Irezabal, 2010).

Es necesario resaltar la importancia de la existencia del piso de concreto, ya que durante el experimento dos, la acumulación de energía (proveniente de la radiación) en el suelo, permitió que el jitomate siguiera con el proceso de deshidratado durante la noche logrando reducir alrededor de un 15 % (bh) la humedad del mismo.

La eficiencia del SSSTI en un día soleado (experimento 1) fue del 23.6 %, sin embargo, esta podría aumentar si se incrementa la carga de producto en el interior del secador, o bien, estableciendo una temperatura máxima de secado mayor a la utilizada en este trabajo y con esto acelerar el proceso de deshidratado.

Derivado de la comparación de las estadísticas de ajuste entre los datos obtenidos experimentalmente y los modelos de capa fina. La aproximación del modelo de Page es el que mejor representa el comportamiento del secado de jitomate en el SSSTI en un día soleado, a una temperatura máxima permitida de 45 °C. Este modelo puede ser utilizado en el desarrollo futuras investigaciones, o bien, en el manejo del secador durante el deshidratado de jitomate.

4.5 Literatura citada

Ajadi, D. A. and Sanusi Y. K. 2013. Effect of Relative Humidity on Oven Temperature of A Locally Design Solar Carbinet Dryer. GJSFR-A 13: 12-17.

Andritsos, N.; Damalapakis, P. and Kolios N. 2003. Use of geothermal energy for tomato drying. GHC bulletin, 24(1): 9-13.

Arun, S., Ayyappan, S. and Sreenarayanan, V. V. 2014. Experimental studies on drying characteristics of tomato in a solar tunnel greenhouse dryer. IJRTE. 3(04): 32-37.

Colina-Irezabal., M. L. 2010. Deshidratación de alimentos. Trillas, México. 216 pp.

Chen, W. and Liu W.. 2006. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a lean-to greenhouse. Renew Energy 31(4): 517-535.

Erell, E., Leal, V. and Maldonado E.. 2005. Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. Boundary Layer Meteorol. 114(1): 205-231.

FIRA. 2017. Panorama Agroalimentario: Tomate rojo 2017. 25 pp. Disponible en: <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=65310> (Consulta: Octubre, 2017).

Hossain, M. A.; Amer, B. M. A. and Gottschalk, K. (2008). Hybrid solar dryer for quality dried tomato. *Dry Technol.* 26(12), 1591-1601.

Iriarte, A. A.; Bistoni, S. N.; Garcia, V. O. y Luque, V. 2013. Evaluación de un secadero solar tendalero túnel: estudio de secado de manzanas. *AVERMA.* 17:02.01-02.08

Janjai, S. and Bala B. K. 2012. Solar drying technology. *Food Eng. Rev.* 4(1): 16-54.

Janjai, S. 2012. A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: development and dissemination. *Int J Energy and environ,* 3, 383-98.

Janjai, S.; Lamert, N.; Intawee, P.; Mahayothee, B.; Bala, B. K.; Nagle, M. and Müller, J. 2009. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Sol. Energy* 83(9): 1550-1565.

Kipping, D. R.; Ortiz-Laurel, H.; Méndez-Gallegos, S. de J. y Amante-Orozco, A. 2012. Fundamentos del secado solar de productos vegetales, teoría cum praxi. *Colegio de Postgraduados.* 147 pp.

Lingayat, A.; Chandramohan, V. P. and Raju, V. R. K. (2017). Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying. *Energy Procedia.* 109: 409-416.

Monsalve, J. y Machado, M. 2007. Evaluación de dos métodos de deshidratación del tomate (*Lycopersicon esculentum* mill) variedad manzano. *Multiciencias.* 7(3): 256-265.

Nielsen, S. S. 2010. *Food analysis.* 4ta ed. Springer: New York. 550 p.

Moreno, D. C.; Sierra, H. M. y Díaz-Moreno, C. 2014. Evaluación de parámetros de calidad físico-química, microbiológica y sensorial en tomate deshidratado comercial (*Lycopersicon esculentum*). *Rev. U. D. C. A. Act. & Div. Cient.* 17(1): 131-138.

Olguin, J. Q. y Durán, R. R. (2017). Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero. *REMEXCA.* 8(2): 321-331.

Pangavhane, D. R.; Sawhney R. L. and Sarsavadia P. N. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy.* 27(6): 579-590.

Prakash, O. and Kumar, A. 2014. Solar greenhouse drying: a review. *Renew. and Sustainable Energy Rev.* 29: 905-910.

Prakash, O.; Laguri, V.; Pandey A.; Kumar, A. and Kumar, A. 2016. Review on various modelling techniques for the solar dryers. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 62: 396-417.

Sacilik, K.; Keskin, R. and Elicin, A. K. 2006. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *J Food Eng.* 73(3): 231-238.

Taheri-Garavand, A.; Rafiee, S. and Keyhani A.. 2011. Effect of temperature, relative humidity and air velocity on drying kinetics and drying rate of basil leaves. *Electronic Journal of Environmental. J. Agric. Food Chem.* 10(4): 2075-2080.

Yaldiz, O.; Ertekin, C. and Uzun, H. I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy.* 26(5): 457-465.

CAPÍTULO 5. MODELACIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA MEDIANTE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) EN UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO⁵

Spatial Modeling of temperature through Computational Fluid Dynamics (CFD) in a greenhouse type solar dryer

Angel Garduño-García¹; Irineo L. López-Cruz¹; Agustín Ruíz-García¹;
Romantchik-Kriuchkova¹

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad
Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de
México, C. P. 56230, México.

Correo-e: ilopez@correo.chapingo.mx, tel.: 01 595 952 1500 ext. 1551 (*Autor
de correspondencia)

5.1 Resumen

Todo sistema de secado solar debe ser diseñado para satisfacer los requerimientos del producto a deshidratar, así como las condiciones ambientales donde se utilizará, sin embargo, es complicado construir y evaluar secadores solares para cualquier producto agrícola y condición climática. El uso de modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite estudiar el comportamiento de estas variables, y así, ayudar en el diseño de secadores solares. El objetivo del presente estudio fue generar un modelo CFD para simular el comportamiento espacial (horizontal y vertical) de temperatura y velocidad del aire en el interior de un sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI) con ventilación natural. El modelo CFD generado incluye en su estructura la turbulencia mediante el modelo $k-\epsilon$ realizable y una fuente de calor expresada en el modelo de radiación de ordenadas discretas (DO). El modelo CFD se alimentó y evaluó con datos experimentales recopilados en un SSSTI ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. De acuerdo con la solución del modelo computacional, el secador alcanza una temperatura máxima de 68.25 °C, además la distribución de temperatura en el plano a la altura de las mesas de secado es aproximadamente homogénea, lo cual es ideal para el proceso de deshidratado. Sin embargo, el flujo de aire a esta misma altura no presenta un campo de velocidades homogéneo, con lo cual se concluye que es necesario rediseñar el sistema de ventilación para obtener un comportamiento favorable del flujo de aire al interior del SSSTI. La evaluación mostró que existe un MAE de 1.25 entre mediciones en el sistema real y predicciones del modelo, con lo cual

⁵ Artículo para ser enviado a revista científica

se determinó que el modelo es confiable y puede ser utilizado para simular diferentes escenarios y ayudar en el diseño del SSSTI en función de parámetros constructivos, climáticos y de propiedades del producto a deshidratar.

Palabras clave

Modelo numérico, sistema de ventilación, deshidratación, productos agrícolas, simulación, parámetros de diseño.

5.2 Introducción

El uso de la energía solar en México para el deshidratado de productos agrícolas ha cobrado importancia ya que existen productos como frutas y verduras que, si no se comercializan de manera inmediata después de la cosecha, representan grandes pérdidas. De acuerdo con la FAO (2015), México pierde cerca del 37% de sus alimentos frescos. Una alternativa a este problema es conservar dichos productos mediante su deshidratación para incrementar la vida post-cosecha y prolongar el tiempo en el que pueden ser comercializados (Castañeda-Miranda *et al.*, 2012). El método más utilizado para conservar productos agrícolas es el deshidratado a la intemperie, sin embargo, bajo condiciones climáticas hostiles conduce a pérdidas en la cantidad y calidad del producto (Pangavhane *et al.*, 2002). Estas pérdidas están relacionadas con la contaminación por suciedad, polvo e infestación por insectos, roedores y otros animales (Janjai y Bala, 2012; Prakash *et al.*, 2016). Una posible solución a esto, es el uso de sistemas de secado solar con control del clima, lo cual puede reducir las pérdidas de cosechas y mejorar la calidad de productos deshidratados en comparación con métodos tradicionales (Yaldiz *et al.*, 2001).

El funcionamiento de los secadores solares está basado en el principio invernadero, donde la energía solar es capturada mediante colectores que elevan la temperatura del fluido (aire), el cual realiza el proceso de secado, por lo que, la eficiencia de un sistema de secado habitualmente se expresa a través de diferentes parámetros tales como: eficiencia del secador, eficiencia del captador solar, tasa de extracción de humedad específica y capacidad evaporativa (Olguin y Durán, 2017). Debido a lo anterior, todo sistema de secado solar debe ser

diseñado en forma apropiada para satisfacer los requerimientos de un producto específico y presentar su desempeño óptimo en cuanto a tiempos de secado y calidad final del producto. Esto significa que la configuración (dimensiones, materiales de cubierta y estructurales, microclima) del secador depende de factores ambientales y económicos. Pero los experimentos a gran escala con diferentes productos, estaciones del año, configuraciones del sistema pueden resultar muy costosos e imprácticos (Bala y Woods, 1994). Por esto, el desarrollo de modelos matemáticos (estáticos y dinámicos) y simulación por computadora son una herramienta básica para predecir el comportamiento de un sistema de secado solar. El desarrollo de modelos matemáticos de los secadores solares es necesario para poder incrementar el conocimiento de los procesos físicos asociados con la deshidratación. Pero también para controlar, diseñar y optimizar este sistema. Además de contribuir en el diseño de secadores, los modelos matemáticos son importantes en la operación del sistema, la calidad del producto a secar y el ahorro de energía (Prakash *et al.*, 2016).

En general, se han aplicado tres enfoques para modelar matemáticamente el sistema secador solar: modelos mecanicistas, modelos empíricos y modelos numéricos o de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). De acuerdo con Bala y Janjai (2013), el futuro de las investigaciones referentes a secador solares está encaminado al estudio de la optimización de la calidad del producto y la optimización de los parámetros de diseño de los secadores mediante el uso de técnicas como el análisis de fluidos computacional.

Los modelos matemáticos que permiten estudiar el comportamiento espacial de un secador solar tipo invernadero representado por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales y que utilizan soluciones numéricas basadas en CFD, solo se han aplicado de manera incipiente en secadores solares tipo invernadero. Por lo tanto, existe un gran potencial para futuras investigaciones como una herramienta muy importante que puede contribuir a la generación un diseño de secador solar, cuya distribución de las variables climáticas en el interior sea la

más adecuada para el secado de diferentes productos agrícolas (Garduño *et al.*, 2017).

El objetivo del presente trabajo es generar un modelo CFD para simular el comportamiento espacial de la temperatura en un secador solar tipo invernadero en condiciones de no-carga y evaluar el modelo computacional mediante mediciones realizadas en el sistema real.

5.3 Materiales y métodos

5.3.1 Descripción del secador solar

El sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI) estudiado (Figura 1), se encuentra ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México (19°29' 'N, 98°53 O y a 2,250 m de altitud). El SSSTI está orientado en la dirección norte-sur y tiene dimensiones de 9 x 12 m de base por 3.4 m de altura, asimismo cuenta con una superficie interior de 108 m² y un volumen aproximado de 211 m³. La estructura es de acero galvanizado, la cubierta es de policarbonato de doble pared de 6 mm de espesor y el piso es de concreto con un espesor de 0.15 m. El secador cuenta con cuatro entradas de aire de 1.23 m de ancho por 0.53 m de alto y una más (puerta) de 2 x 2 m, todas forradas con malla antiáfidos de 40 x 26 hilos. En la pared sur se encuentran instalados dos extractores con una capacidad de 9,435 m³ h⁻¹ cada uno, los cuales son accionados mediante motores monofásicos de 0.5 HP (373 W) y permiten una renovación del aire en el interior del secador en un tiempo aproximado de 40 s. En el interior del SSSTI se encuentran instaladas 18 mesas con charolas 1.8 x 1.5 m, obteniendo así una superficie de secado de 48.6 m².



Figura 1. Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica y cubierta de policarbonato ubicado en Chapingo, México.

5.3.2 Modelación de la temperatura y flujo de aire

La CFD comprende las ecuaciones de Navier-Stokes, expresadas como un grupo de ecuaciones diferenciales parciales. Estas ecuaciones pueden ser representadas en la forma de la ecuación general de conservación (1) (Fernández-Oro, 2012; Flores-Velázquez *et al.*, 2017):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (1)$$

donde, ∂ es la derivada, ρ la densidad, kg m^{-3} , t es el tiempo, ∇ la divergencia, ϕ variable de estado considerada (en este trabajo, temperatura del aire, K), \vec{v} es la velocidad del aire, m s^{-2} , Γ el coeficiente de difusión, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ y S_ϕ el término fuente.

Las ecuaciones de gobierno para el flujo de un fluido tridimensional dependiente del tiempo y las transferencias de calor y masa de un fluido Newtoniano compresible, así como aquellas que rigen el transporte de otras variables, se pueden enunciar de forma conservativa como en la ecuación (1). En cada caso, los coeficientes de transporte, así como la variable específica que sustituye a ϕ , adoptan formas diferentes (Versteeg y Malalasekera, 2007).

La ecuación de conservación de masa puede expresarse como:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

donde ρ la densidad, kg m^{-3} , t es el tiempo, ∇ la divergencia y \vec{v} es la velocidad del aire, m s^{-2} .

Por otro la ecuación de conservación de momento en x, y y z, respectivamente se define como:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\delta t} + \nabla(\rho u \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\delta x} + \nabla(\mu \text{ grad } u) + S_{M_x} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\delta t} + \nabla(\rho v \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\delta x} + \nabla(\mu \text{ grad } v) + S_{M_y} \quad (3b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\delta t} + \nabla(\rho w \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\delta x} + \nabla(\mu \text{ grad } w) + S_{M_z} \quad (3c)$$

donde ρ la densidad, kg m^{-3} , t es el tiempo, ∇ la divergencia, u , v y w son componentes de la velocidad del aire \vec{v} , m s^{-2} , p es presión, Pa, μ es viscosidad, Pa s, y S_M es una fuente de momento.

Finalmente, la ecuación de energía puede tomar la forma:

$$\frac{\partial(\rho i)}{\delta t} + \nabla(\rho i \vec{v}) = -p \nabla(\vec{v}) + \nabla(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i \quad (4)$$

donde ρ la densidad, kg m^{-3} , t es el tiempo, ∇ la divergencia, \vec{v} es la velocidad del aire, m s^{-2} , p es presión, Pa, μ es viscosidad, Pa s, y S_M es una fuente de momento. donde T es temperatura, K, k es conductividad térmica, $\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$, $p = p(\rho, T)$ e $p = C_v T$, C_v es el calor específico a volumen constante, J.

5.3.3 Modelo de turbulencia

El efecto de turbulencia en el flujo fue implementado con el modelo k - ε realizable. Este modelo de turbulencia está caracterizado por la energía cinética k , representada por:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\delta t} + \frac{\partial}{\delta x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\delta x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (4)$$

y por la tasa de disipación de energía cinética ε , expresada como:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\delta t} + \frac{\partial}{\delta x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\delta x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (5)$$

donde:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (6)$$

donde, ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad dinámica, μ_t es la viscosidad turbulenta, G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debida al gradiente de velocidad media, G_b es la generación de energía cinética turbulenta debida a las fuerzas de flotación, Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante, C_2 y $C_{1\varepsilon}$ son constantes. σ_k y σ_ε son los números de Prandtl para k y ε , respectivamente. S_k y S_ε son términos fuente definidos por el usuario. Las constantes del modelo tienen los siguientes valores: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$ (ANSYS, Inc., 2013).

5.3.4 Modelo de radiación solar

Para simular el efecto del flujo de radiación solar en esta investigación se utilizó el modelo solar de ordenadas discretas (DO) incluido en Fluent para calcular el vector de posición del sol y el flujo de calor integrado para cada superficie opaca y semitransparente adentro del dominio con respecto a datos, fechas, localización, condiciones del cielo, radiación solar específicas, y la transmisión, absorción y reflexión del policarbonato (cubierta del secador). La intensidad de radiación depende direccional y espacialmente de las fuentes y receptores. De esta forma, se establece que está influenciada por la absorción y la emisión local (fuente-sumidero de radiación), así como por la dispersión direccional (dispersión y concentración locales). La ecuación general se expresa de la siguiente manera (Kim *et al.*, 2008):

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s}')}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}') = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'$$

donde \vec{r} es el vector de posición, \vec{s} es el vector de dirección, \vec{s}' es la dirección de dispersión, a es el coeficiente de absorción, n es un índice de refracción, σ_s es el

coeficiente de dispersión, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T es la temperatura local, Φ es una función desfase y Ω' es un ángulo sólido.

5.3.4 Mediciones y sistema de registro de datos

Los puntos de medición durante los experimentos se distribuyeron en todo el volumen del secador (Figura 2). La temperatura del aire (T , °C) se monitoreó mediante sensores 108-L (Campbell Scientific Inc., EE.UU). Las temperaturas del suelo (T_s) y cubierta (T_c , °C), se midieron con termopares tipo K. La temperatura en el exterior del secador (T_{amb} , °C) y radiación global (R_g , $W m^{-2}$) se registraron con una estación meteorológica HOBO U30 (Onset Computer Corporation, EE.UU). Las señales generadas por lo sensores se almacenaron y promediaron cada 30 minutos para su posterior análisis. Durante el proceso de recolección de datos, los sensores se protegieron de la radiación solar mediante tubos horizontales de 0.5 m de longitud recubiertos de aluminio (Erell *et al.*, 2005).

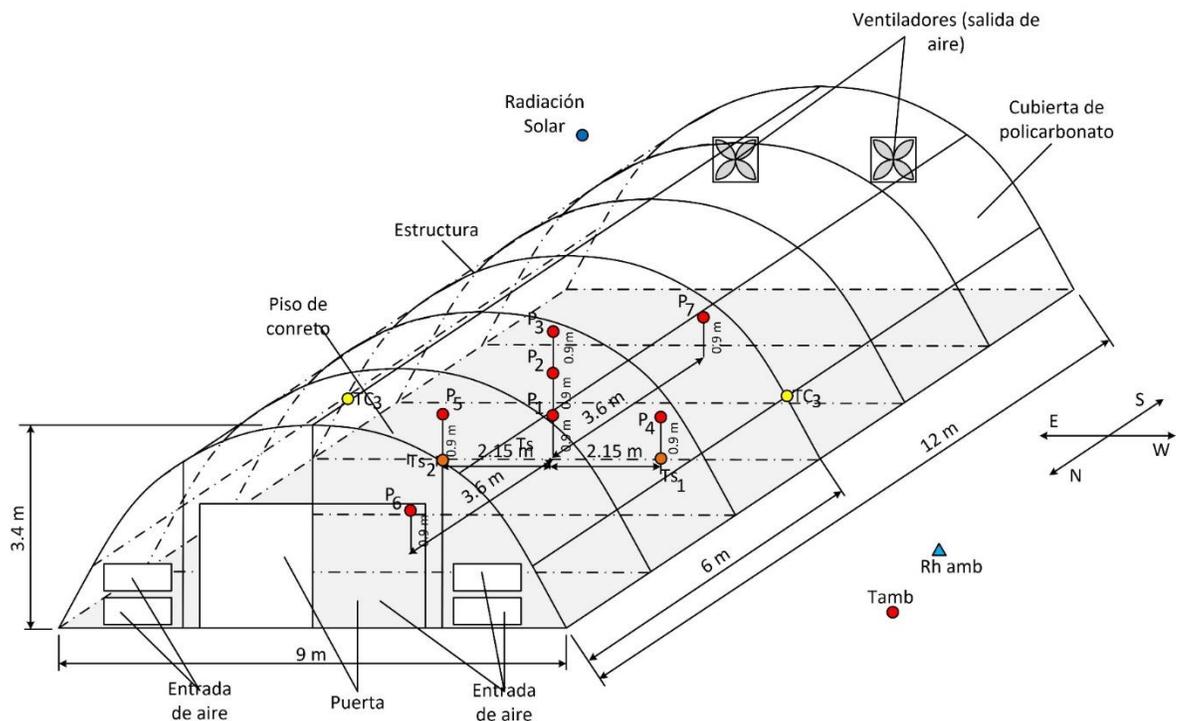


Figura 2. Distribución de puntos de medición para las variables temperatura del aire (T), temperatura de la cubierta (T_c), temperatura del suelo (T_s), radiación solar global (R_g) y temperatura ambiental (T_{amb}).

5.3.5 Construcción del modelo tridimensional de Dinámica de Fluidos Computacional (3D-CFD)

De acuerdo con Anderson (1995) y Fernández-Oro (2012), un modelo de CFD se desarrolla en 3 etapas: 1) Fase de pre-proceso, la cual incluye la selección del problema a estudiar (en este caso, un SSSTI), creación de la geometría, mallado del dominio computacional, definición de las propiedades del fluido o fluidos, establecimiento de condiciones de frontera y exportación de la malla; 2) Fase de solución; constituye la parte central del programa de resolución y es la encargada de resolver de forma iterativa los modelos contemplados previamente en el preproceso, el programa puede resolver las ecuaciones para cada una de las celdas hasta alcanzar la convergencia, lo cual ocurre cuando los residuales alcanzan los valores de 1×10^{-3} , para la ecuación de momento y continuidad, y 10^{-6} para la energía (criterios por omisión en el programa (FLUENT), si el usuario requiere mayor precisión pueden ser modificados); 3) Post-proceso, en esta fase se incluyen normalmente una serie de herramientas gráficas que permiten analizar los resultados, tales herramientas permiten obtener variables integradas y promediadas para disponer de resultados globales. Esto incluye: representación gráfica del dominio y la malla, mapas de contorno de las variables y graficas de vectores y líneas de corriente, gráficas y distribuciones, gráficos de superficies bidimensionales y tridimensionales, así como animaciones y exportación de resultados en diferentes formatos.

Para analizar la distribución de temperatura dentro del secador solar tipo invernadero, se generó un modelo computacional basado en las dimensiones y características de los datos recabados en el SSSTI. La simulación del modelo que describe el comportamiento espacial de la temperatura fue ejecutada en FLUENT (ver. 17.1, ANSYS Inc., PA, USA).

La discretización del dominio se realizó mediante pruebas de mallado con diversos tamaños de elemento para el SSSTI. Se encontró que el tamaño de elementos adecuado (Figura 4) posee una malla con un total de 239,852 elementos. Para dicho mallado se obtuvo un valor mínimo para el parámetro de

calidad ortogonal de 0.202 y valor máximo de asimetría de malla de 0.695. De acuerdo con la escala presentada por Gok *et al.* (2017), el mallado del SSSTI presenta una “buena” calidad de ortogonalidad de la malla y una “buena” asimetría de la malla (Figura 3).

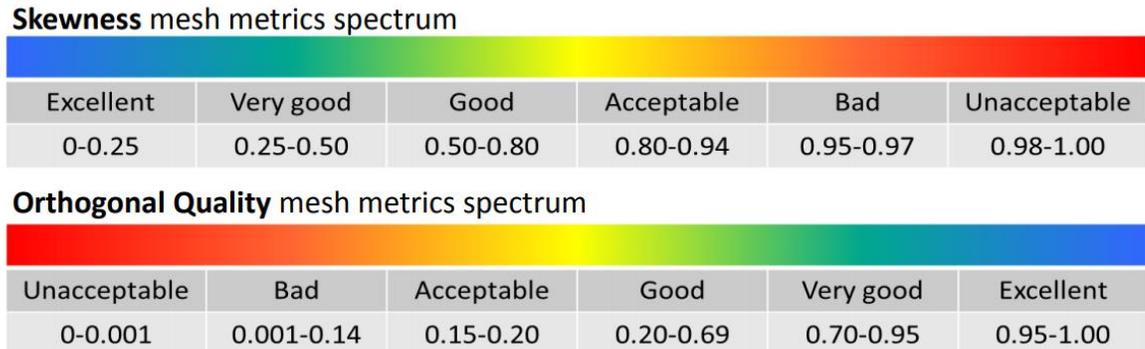


Figura 3. Espectros métricos de la calidad ortogonal y simetría de la malla (Gok *et al.*, 2017).

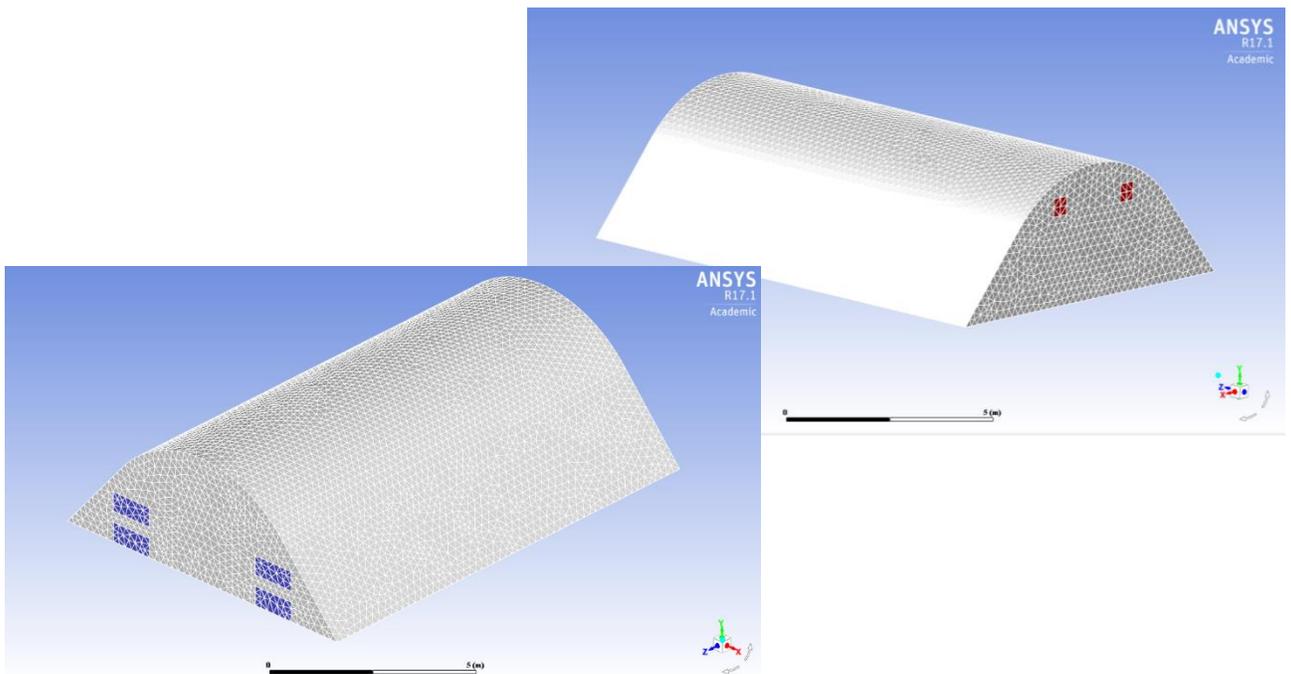


Figura 4. Malla del modelo computacional de SSSTI.

Las condiciones para alimentar y evaluar el modelo se tomaron como el promedio de los datos recabados entre las 2:30 y 3:00 pm el día 2 de noviembre de 2017, dichas condiciones se presentan en el en el Cuadro 1. En la Figura 3, se puede

observar la entrada al secador, la cual corresponde a las cuatro ventanas (considerando que la puerta se mantuvo cerrada mediante la prueba), y la salida se considera las ventanas donde están ubicados los extractores (los cuales se mantuvieron apagados durante la prueba).

Cuadro 1. Resumen de las condiciones iniciales y de frontera del modelo CFD.

	Descripción	Magnitud		
Tipo de modelo	Simulación 3D			
Solución	Estado estacionario			
Viscosidad	$k - \varepsilon$ con flotabilidad			
Ecuación de energía	Activa			
Entrada al dominio	Velocidad de entrada	de	1×10^{-3} m/s	
	Temperatura		26.67 °C	
Salida del dominio	Presión salida	de	0	
Radiación	W/m ²		745.74	
	Aire		Concreto	Policarbonato
Densidad (kg m⁻³)	1.225		2120	1200
Calor específico (J kg⁻¹ K⁻³)	1006.43		170	1200
Conductividad Térmica (W m⁻¹K⁻¹)	0.0242		0.75	0.21

Para la evaluación del modelo, se utilizaron las mediciones de temperatura del aire en el interior del secador (Figura 2), las cuales fueron comparadas con los valores simulados mediante la estadística MAE.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_i|$$

donde $D_i = T_{exp,i} - T_{pre,i}$, T_{exp} es la Temperatura experimental (K) y T_{pre} la Temperatura del modelo (K).

5.4 Resultados y Discusión

Derivado de la solución del modelo computacional se obtuvo la distribución horizontal y vertical de la temperatura del aire (Figura 5). Como se puede observar, las temperaturas más elevadas se concentran en la parte Oeste del secador, esto se debe a que las simulaciones se corrieron con datos promediados entre las 2:30 y 3:00 pm, por lo cual, la radiación solar también provenía del hemisferio oeste. La temperatura máxima alcanzada en el interior del secador fue alrededor de 341.4 K (68.25 °C). Este valor es similar a lo obtenido en un modelo CDF por Lokeswaran y Eswaramoorthy (2013), quienes reportan una temperatura máxima alcanzada alrededor de los 68 °C para un secador solar tipo invernadero de convección natural. Sin embargo, la temperatura predicha por nuestro modelo es mayor a la que reportan Somsila y Teeboonma (2014), quienes registraron temperaturas entre los 30.85 y 36.85 °C en el centro del secador derivado de un modelo CFD para un secador de solar tipo invernadero de techo plano y convección forzada. Por otro lado, derivado de la solución del modelo computacional, también se puede observar que la temperatura mínima es de 314.8 K (41.65 °C), y esta se concentra en las ventilas de entrada de flujo al secador, como se esperaría ya que el aire que ingresa al SSSTI se encuentra a temperatura ambiente (26.67 °C). Por otro lado, se observa un corte longitudinal a la altura del producto (0.9 m sobre el suelo), de acuerdo con el comportamiento mostrado por el gráfico derivado de la simulación, la temperatura predominante en este plano ronda entre los 338 y 341 K y es aproximadamente homogénea (Figura 6), con lo cual, se puede afirmar que el proceso de secado al introducir un producto agrícola será uniforme.

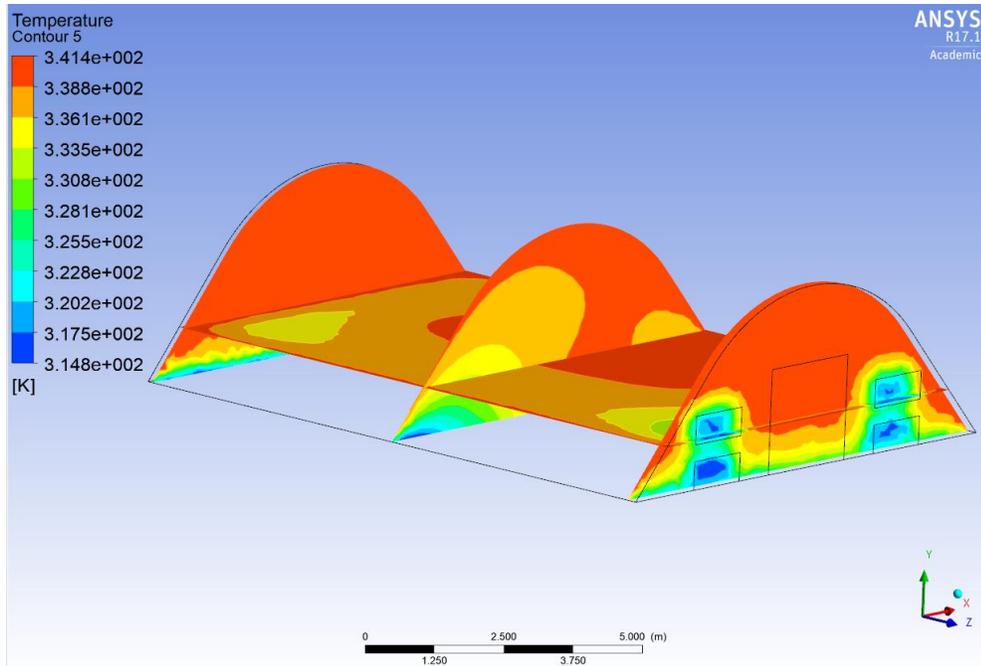


Figura 5. Distribución espacial de temperatura en el interior del secador solar tipo invernadero predicha por el modelo 3D-CFD.

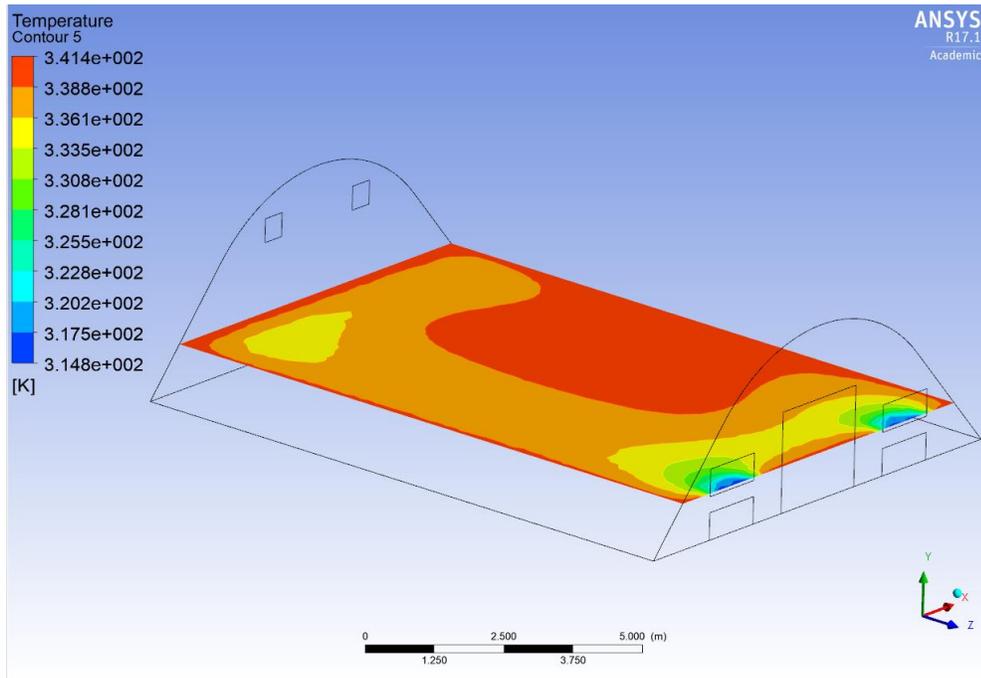


Figura 6. Distribución espacial de temperatura a la altura de las mesas de secado predicha por el modelo 3D-CFD.

Montero *et al.* (2013), señalan que la Dinámica de Fluidos Computacional tiene la capacidad de proveer información detallada de la distribución de temperaturas

y campos de velocidad en cualquier punto del dominio computacional. Para este trabajo los puntos de interés fueron las ubicaciones de los sensores en las líneas medias imaginarias, de los que se obtuvieron los valores de temperatura para compararlos con las mediciones experimentales. Derivado de esta comparación se obtuvo un MAE = 1.25 (Cuadro 2). Dado que los productos agrícolas generalmente son deshidratados en un rango de temperatura que va aproximadamente de los 45 a los 60 °C y no a una temperatura constante, un MAE de 1.25 °C muestra que el modelo CFD es confiable y puede ser utilizado para simular distintos escenarios dentro del secador solar, considerando las características del producto a ser deshidratado, la configuración del sistema de ventilación, o bien, el comportamiento climático del lugar donde será construido el secador.

Cuadro 2. Promedio del error absoluto entre los valores de temperatura medidos y los simulados por el modelo CFD.

	Valor medido	Valor predicho	Residual	MAE
	T (°C)	T (°C)		
Punto 1	64.73	66.4	1.67	
Punto 2	65.93	66.3	0.37	
Punto 3	67.59	66.5	1.09	
Punto 4	68.6	66.4	2.2	
Punto 5	65.37	64	1.37	1.23
Punto 6	64.65	65	0.35	
Punto 7	66.96	65.4	1.56	

Finalmente, en la Figura 7, se muestra el comportamiento del flujo de aire en un plano horizontal (a la altura del producto) en el interior del secador, como se puede observar las velocidades del aire son muy pequeñas debido a que el flujo de aire en la entrada es muy cercano a cero. Además, a pesar de que las velocidades más altas se concentran a la altura de las mesas no lo hacen de manera homogénea, sino que se concentran en la parte central del plano,

mientras que en los extremos el flujo de aire es casi nulo, lo cual indica que no existe una correcta ventilación del secador.

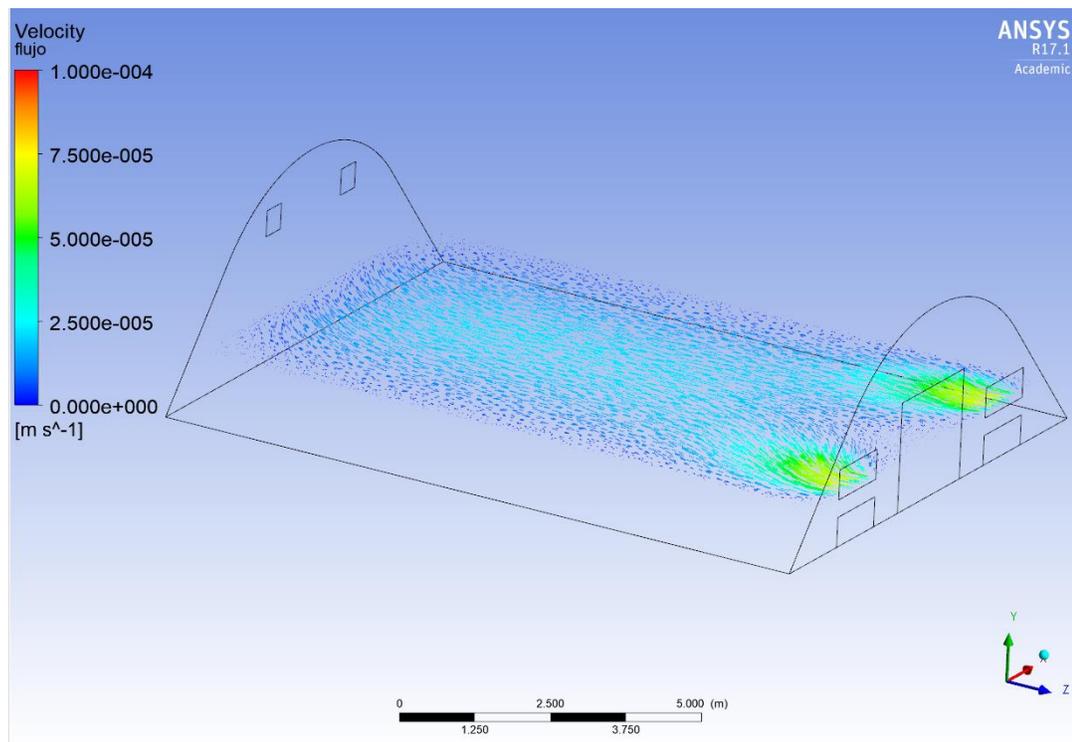


Figura 7. Flujo de aire en el interior del secador solar tipo invernadero predicho por el modelo CFD.

5.5 Conclusiones

En este trabajo se presentó una aplicación de la modelación de Dinámica de Fluidos Computacional para el estudio del clima en un secador solar tipo invernadero. El objetivo fue analizar y comparar el comportamiento espacial de la temperatura en el interior del secador cuando los extractores se mantuvieron apagados, es decir, con ventilación natural. Los resultados derivados de este estudio muestran que la temperatura máxima alcanzada en el interior del secador se encuentra alrededor de los 68 °C, lo cual está muy por encima de lo requerido para el deshidratado de diferentes productos agrícolas, por lo cual, se hace evidente la necesidad de utilizar un sistema de ventilación por convección forzada con el objetivo de reducir la temperatura en el interior del secador. Por otro lado, el comportamiento de la temperatura en el plano a la altura de las mesas muestra

un comportamiento aproximadamente constante, lo cual es ideal para lograr un deshidratado homogéneo.

Con respecto al flujo de aire en el interior del secador, se observó que no existe una circulación adecuada, ya que las velocidades no se comportan de manera homogénea en el plano dónde se encuentra ubicado el producto a deshidratar. Este problema puede ser resuelto mediante el rediseño del sistema de ventilación, tomando en cuenta tanto el área y la ubicación de las ventanas por las cuales ingresa el flujo de aire al secador, así como la ubicación y el caudal generado por los extractores a la salida del mismo.

El MAE de 1.23 °C obtenido durante la evaluación del modelo confirma que, para esta aplicación, el modelo es confiable; ya que durante el proceso de deshidratado de productos agrícolas regularmente se establecen rangos (y no valores constantes) de temperatura en los cuales el producto en cuestión obtiene una buena calidad final, es decir, sus propiedades físicas y químicas son adecuadas para su consumo o comercialización. una vez evaluado, el modelo se convierte en una herramienta poderosa de simulación para explorar las distribuciones de temperatura y flujos de aire causados por diferentes configuraciones del sistema de ventilación. Además, es este mismo modelo puede ser empleado para simular distintos escenarios dentro del secador y así mejorar el diseño en función de las características del producto a deshidratar, la configuración del sistema de ventilación, las dimensiones y materiales de construcción del secador, el comportamiento del clima donde se instalará el inmueble y muchos otros parámetros que influyen de manera directa en el costo y eficiencia del sistema.

5.6 Literatura citada

ANSYS, Inc. 2013. ANSYS 14.5. Help, Theory Reference, Copyright 2013. 945p. Bala, B. K., & Woods, J. L. (1994). Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy*, 53(3), 259-266.

Bala, B. K., & Janjai, S. (2013). Solar drying of agricultural products. *Stewart Postharvest Review*, 9(2), 1-8.

Castañeda-Miranda, A., A. González-Parada., R. Guzmán-Cabrera, C., O. G. Ibarra-Manzano. 2012. Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. *Acta Univ.* 22: 14-19.

Erell, E., Leal, V. and Maldonado E.. 2005. Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. *Boundary Layer Meteorol.* 114(1): 205-231.

FAO. 2015. Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. Boletín 2. 31 pp. <http://www.fao.org/3/I4655S.pdf>. (Consulta: Marzo 2017).

Fernández-Oro, J. M. (2012). Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Reverté.

Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Ojeda, W., & Ruíz-García, A. (2017). Thermal and ammonia concentration gradients in a rabbit barn with two ventilation system designs. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(2), 134-140.

Garduño-García, A., López-Cruz, I. L., & Ruiz-García, A. 2017. Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural and forced convection for agricultural products: state of the art. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(1), 19-36.

Gok, K., Inal, S., Gok, A., & Gulbandilar, E. (2017). Comparison of effects of different screw materials in the triangle fixation of femoral neck fractures. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 28(5), 81.

Janjai, S., and B. K. Bala. 2012. Solar drying technology. *Food Eng. Rev.* 4: 16-54.

Kim K., J. Y. Yoon, H. J. Kwon, J. H. Han, S. W. Nam, G. A. Giacomelli, I. B. Lee, and J. E. Son. (2008). 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Engineering*.100: 245– 255

Lokeswaran, S., and M. Eswaramoorthy. (2013). An experimental analysis of a solar greenhouse drier: Computational Fluid Dynamics (CFD) Validation. *Energ. Source Part A* 35: 2062-2071.

Olguin, J. Q. y Durán, R. R. (2017). Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero. *REMEXCA*. 8(2): 321-331.

Pangavhane, D. R., R. L. Sawhney, and P. N. Sarsavadia. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy* 27: 579-590

Prakash, O., Laguri, V., Pandey, A., Kumar, A., & Kumar, A. (2016). Review on various modelling techniques for the solar dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 396-417.

Prakash, O., & Kumar, A. (Eds.). (2017). *Solar Drying Technology: Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment*. Springer.

Somsila, P., & Teeboonma, U. (2014). Investigation of temperature and air flow inside Para rubber greenhouse solar dryer incline roof type by using CFD technique. *Advanced Materials Research*.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education.

Yaldiz, O., C. Ertekin, and H. I. Uzun. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26: 457-465.

6. CONCLUSIONES GENERALES Y DISCUSIÓN

El sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI) de forma parabólica, es una alternativa para superar las desventajas presentes durante el secado a la intemperie o bajo invernaderos de cubierta plástica. El SSSTI construido en esta investigación se ubica en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México (19°29' 'N, 98°53 O y a 2,250 m de altitud). El clima en este lugar está clasificado como templado subhúmedo, con precipitación media anual de 645 mm y una temperatura promedio anual de 15 °C, con heladas tempranas a fines de septiembre y tardías en abril. La radiación global máxima registrada durante las pruebas fue de alrededor 970 W m⁻² en agosto de 2016 y de 781 W m⁻² en noviembre de 2017. Estas condiciones climáticas fueron propicias para que el secador alcanzara la temperatura necesaria para el deshidratado de diferentes productos agrícolas. Sin embargo, el sistema aún debe ser evaluado en otro tipo de climas (semi-árido, cálido seco, cálido húmedo, etc.).

La evaluación del secador construido se llevó a cabo mediante pruebas realizadas en condiciones de no-carga y durante el secado de *Stevia* y jitomate. Para el caso de la *Stevia* se logró eliminar el problema de pérdidas por humedecimiento y ennegrecimiento de hojas que se presenta al deshidratar bajo invernadero convencional y se redujo el tiempo de secado de dos días a un tiempo aproximado de seis horas. Para el caso del jitomate, se estableció una temperatura máxima en el interior del SSSTI de 45 °C (con el objetivo de no dañar la propiedades visuales y nutrimentales del producto), dando como resultado una reducción del contenido de humedad del 95 al 24 % (bh) en un tiempo de 7 h durante un día soleado, logrando conservar el color original del producto. En ambos experimentos la humedad relativa en el interior del secador fue menor a la exterior. Esto ayudó durante el proceso de secado, ya que, a baja humedad relativa del aire, la transferencia de calor y masa es elevada, por lo tanto, la pérdida de agua en el tiempo por parte del producto es mayor.

En el interior del secador se tiene un gradiente vertical de temperatura, el cual se debe tomar en cuenta a la hora de definir la altura de las charolas de secado, así

como la ubicación de los sensores utilizados para retroalimentar la información captada por el sistema de control. Es necesario resaltar la importancia de la existencia del piso de concreto, ya que, la acumulación de energía (proveniente de la radiación) en el suelo permite continuar, aunque a menor escala, con el proceso de deshidratado durante la noche.

La eficiencia del SSSTI en un día soleado fue del 23.6%, sin embargo, esta podría aumentar si se incrementa la carga de producto en el interior del secador, o bien, estableciendo una temperatura máxima de secado mayor a la utilizada en el presente trabajo y con esto acelerar el proceso de deshidratado.

Derivado de la comparación de las estadísticas de ajuste entre los datos obtenidos experimentalmente y los modelos de capa fina. La aproximación del modelo de Page es el que mejor representa el comportamiento del secado de jitomate en el SSSTI en un día soleado, a una temperatura máxima permitida de 45 °C. Este modelo puede ser utilizado en el desarrollo futuras investigaciones, o bien, en el manejo del secador durante el deshidratado de jitomate.

En esta investigación, también se presentó una aplicación de la modelación de Dinámica de Fluidos Computacional para el estudio del clima en un secador solar tipo invernadero. El objetivo fue analizar y comparar el comportamiento espacial de la temperatura en el interior del secador cuando los extractores se mantuvieron apagados, es decir, con ventilación natural. Los resultados derivados de este estudio muestran que la temperatura máxima alcanzada en el interior del secador se encuentra alrededor de los 68 °C, lo cual está muy por encima de lo requerido para el deshidratado de diferentes productos agrícolas, por lo cual, se hace evidente la necesidad de utilizar un sistema de ventilación por convección forzada con el objetivo de reducir la temperatura en el interior del secador. Por otro lado, el comportamiento de la temperatura en el plano a la altura de las mesas muestra un comportamiento aproximadamente constante, lo cual es ideal para lograr un deshidratado homogéneo. Referente al flujo de aire en el interior del secador, se observó que no existe una circulación adecuada, ya que las velocidades no se comportan de manera homogénea en el plano dónde se

encuentra ubicado el producto a deshidratar. Este problema puede ser resuelto mediante el rediseño del sistema de ventilación, tomando en cuenta tanto el área y la ubicación de las ventanas por las cuales ingresa el flujo de aire al secador, así como la ubicación y el caudal generado por los extractores a la salida del mismo. El modelo obtenido es una herramienta poderosa de simulación para explorar las distribuciones de temperatura y flujos de aire causados por diferentes configuraciones del sistema de ventilación. Además, es este mismo modelo puede ser empleado para simular distintos escenarios dentro del secador y así mejorar el diseño en función de las características del producto a deshidratar, la configuración del sistema de ventilación, las dimensiones y materiales de construcción del secador, el comportamiento del clima donde se instalará el inmueble y muchos otros parámetros que influyen de manera directa en el costo y eficiencia del sistema.

Hasta ahora, se han desarrollado múltiples modelos teóricos y empíricos para la simulación de los procesos y variables dentro de un secador solar tipo invernadero, sin embargo, son muy limitadas las investigaciones relacionadas con la aplicación de este tipo de modelos en el manejo de los secadores solares mediante la aplicación de diferentes algoritmos de control y enfoques de la Teoría de Sistemas y Control (como control clásico, óptimo, predictivo, adaptable e inteligente) para obtener el desempeño deseado. Por lo tanto, el desarrollo de sistemas de control para mejorar el desempeño del sistema secador solar tipo invernadero es una línea de investigación a desarrollar. Para que los modelos dinámicos del ambiente secador solar tipo invernadero sean una herramienta para conocer mejor el funcionamiento del sistema y también sean útiles para diseñar, optimizar y controlarlo, la generación de su estructura debe complementarse con análisis de sensibilidad, calibración, evaluación, análisis de incertidumbre y asimilación de datos. En el caso de los modelos de capa fina, es necesario generar modelos que en su estructura incluyan el comportamiento de la radiación a lo largo del día, ya que de ella depende fuertemente la temperatura en el interior del secador. Los modelos de Dinámica de Fluidos Computacional, solo se han aplicado de manera incipiente. Por lo tanto, existe un gran potencial

para futuras investigaciones como una herramienta muy importante que puede contribuir a la generación de un diseño de secador solar, cuya distribución de las variables climáticas en el interior sea la más adecuada para el secado de diferentes productos agrícolas.