

DOI: 10.24850/j-tyca-14-05-04

Artículos

Análisis térmico de invernaderos para reconversión de cultivos en la región cálida de Michoacán

Thermal analysis of greenhouses to crops reconversion in a warm zone in Michoacan

Cruz Ernesto Aguilar-Rodríguez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5120-022X>

Jorge Flores-Velázquez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0895-4645>

José Alberto Urrieta-Velázquez³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9293-0739>

¹Tecnológico Nacional de México/ITS de los Reyes, Los Reyes de Salgado, Michoacán, México, ernesto.ar@losreyes.tecnm.mx

²Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos, Texcoco, Estado de México, jorgelv@colpos.mx

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CENID-RASPA, Gómez Palacio, Durango, México, urrieta.jose@inifap.gob.mx

Autor para correspondencia: Jorge Flores-Velazquez, jorgelv@colpos.mx



Resumen

Los brotes de enfermedades en cultivos de zarzamora (*Rubus* subgénero *Eubatus*) en Los Reyes, Michoacán, México, ocasionan pérdidas en la producción. Las condiciones edafoclimáticas, prácticas agrícolas inadecuadas y el cambio climático han favorecido la pudrición de la raíz (*Fusarium* spp.), dejando de cultivarlas con pérdidas equivalentes a los 2 540 millones de pesos anuales (125 millones de dólares). El objetivo de este trabajo fue analizar numéricamente la viabilidad térmica para cultivar tomate (*Solanum lycopersicum* L.) hidropónico en invernadero como alternativa agrícola. Se usaron bases de datos climatológicas y dinámica de fluidos computacional (CFD) para alimentar modelos numéricos y analizar el ambiente de dos invernaderos cenitales típicos de México. Los modelos numéricos se evaluaron mediante un análisis ANOVA de un factor con $p \leq 0.5$. Resultados muestran que la temperatura en el invernadero se mantiene entre el umbral máximo y mínimo para el cultivo de tomate (de 10 a 30 °C). Para acumular 1 398.5 grados días calor (GDC) recomendados por ciclo, en esa región resulta factible almacenar calor para cultivar tres ciclos cortos de tomate. Se identifican periodos críticos debido a las altas temperaturas en los meses de marzo a junio, durante los cuales se requiere ventilación natural con ventanas frontales, cenitales y laterales, para mejorar la tasa de renovación de aire cuando existe un cambio en la dirección del viento predominante.

Palabras clave: dinámica de fluidos computacional, grados días calor, tomate, confort térmico.

Abstract

Recently apparition of diseases in the blackberry crop (*Rubus* subgenre *Eubatus*) in Los Reyes Michoacan, Mexico, has gotten economic decreases. Soil-climatic conditions, erratic plus laborer crop and climatic change, have favored root rot, ceasing to cultivate them with economic losses like 2 540 million Mexican pesos per year (125 million USD). This work aimed to analyze thermal variability to know the alternative to cultivating tomatoes in a hydroponic greenhouse system. Normal data meteorological base and numerical fluid simulation (CFD) were used to feed computational models for analyzing the environment of two typical greenhouses in Mexico. The numerical models were evaluated through a one-way ANOVA analysis with $p \leq 0.5$. Results show that the temperature in the greenhouse is kept between the maximum and minimum threshold for tomato cultivation (10 to 30 °C). To accumulate 1 398.5 Degrees Heat Days (DHC) recommended per cycle, it is feasible to store heat to grow three short tomato cycles in that region. Critical periods are identified due to high temperatures in March to June, during which natural ventilation is required with front, overhead and side windows to improve the air renewal rate when there is a change in the prevailing wind direction.

Keywords: Computational fluid dynamics, degrees days heat, tomato, thermal comfort.

Recibido 08/02/2021

Aceptado 07/03/2022



Introducción

El abandono de tierras en el municipio de Los Reyes, Michoacán, México, se ha visto afectado principalmente por *Fusarium* spp., derivado de prácticas agrícolas inapropiadas y el cambio climático (Fernández-Pavía, Rodríguez-Alvarado, Gómez-Dorantes, Gregorio-Cipriano, & Fernández-Pavía, 2012, Contreras-Pérez *et al.*, 2019), por lo cual es necesario buscar alternativas que permitan la reutilización de dichos espacios.

En 2018, Michoacán fue el tercer lugar en producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a nivel nacional, por debajo de Sinaloa y San Luis Potosí, con una producción anual de 281 848 ton, y el segundo lugar en superficie cultivada con 5 965 ha (SIAP & Sagarpa, 2019), donde destaca su capacidad para cosechar hortalizas.

El tomate bajo invernadero cultivado en sustrato puede ser empleado como cultivo alternativo de producción, con rendimiento de hasta 250 ton/ha (SIAP & Sagarpa, 2019), en función de condiciones ambientales, como rangos de temperaturas entre 10 y 30 °C (Tesi, 2001; Castilla, 2004). En 2018, México produjo 3 780 950 ton de tomate con un valor en el mercado de 31 151 millones (SIAP & Sagarpa, 2019), lo cual demuestra que el tomate sigue siendo uno de los alimentos más rentables y con mejor aceptación en el mercado.

En un invernadero de baja y media tecnología, el ambiente interno depende del microclima exterior, su diseño, el material de construcción y

el tipo de cultivo (Bartzanas, Boulard, & Kittas, 2004; Sethi, 2009; Mesmoudi, Meguallati, & Bournet, 2017; Baxevanou, Fidaros, Bartzanas, & Kittas, 2018). En la actualidad existen herramientas con la capacidad de predecir el ambiente del invernadero mediante la solución a las ecuaciones de transporte, discretizadas en ecuaciones algebraicas y calculadas mediante métodos numéricos. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es útil en la toma de decisiones mediante el análisis y comprensión de los fenómenos físicos presentes en el invernadero (Bouhoun-Ali, Bournet, Cannavo, & Chantoiseau, 2017; Boulard, Roy, Pouillard, Fatnassi, & Grisey, 2017).

El uso de modelos computacionales ha sido ampliamente utilizado para caracterizar y modificar las variables que afectan la producción de los cultivos en los invernaderos. Los modelos computacionales han permitido simular el gradiente térmico derivado del diseño del invernadero y su orientación (Kuroyanagi, 2017; Ntinis, Shen, Wang, & Zhang, 2017); la velocidad del viento y su dirección pueden reducir la tasa de renovación de aire, afectando el transporte de calor y masa entre el exterior e interior del invernadero (Cemek, Atiş, & Küçüktopçu, 2017; Zeroual, Bougoul, & Benmoussa, 2018).

La integración diaria de temperatura local puede utilizarse de forma representativa para medir el desarrollo del tomate (Doorenbos & Pruitt, 1977; Trudgill, Honek, Li, & Van-Straaalen, 2005). Ardila, Gustavo-Fischer y Balaguera-López (2011) estimaron que para cumplir el ciclo del cultivo de tomate bajo invernadero se requieren 1 398.5 grados días calor (GDC) después del trasplante hasta el periodo de cosecha. El cálculo de

GDC se evaluó mediante la fórmula utilizada por Rodríguez y Flores (2006), considerando como temperatura base la recomendada por Rangel y Silvas (1987), y Zotarelli, Scholberg, Dukes, Muñoz-Carpena e Icerman (2009), donde el proceso metabólico del tomate es mínimo (10 °C).

En 2020, Aguilar-Rodríguez, Flores-Velázquez, Rojano-Aguilar, Ojeda-Bustamante e Iñiguez-Covarrubias (2020a) estimaron mediante CFD la acumulación de GDC, con la finalidad de calcular la duración del ciclo de cultivo de tomate en dos regiones productoras de tomate en México. Los resultados que obtuvieron representan el comportamiento térmico espacial y pueden usarse para inferir la duración del ciclo y establecer la fecha de siembra del tomate bajo invernadero.

Ante el aumento en el abandono de tierras en Los Reyes, Michoacán, derivado de las afectaciones ocasionadas por el *Fusarium* spp. y las malas prácticas agrícolas, se plantea que mediante el uso de modelos numéricos, normales climatológicas y cambios en el diseño del invernadero, es posible establecer la viabilidad térmica para cultivar tomate en la región de Los Reyes, Michoacán.

El objetivo del estudio fue determinar la viabilidad térmica para cultivar tomate bajo invernadero durante todo el año; el análisis se realizó empleando normales climatológicas y CFD como herramienta de predicción de temperaturas, y para establecer condiciones de diseño del invernadero favorables para mantener un confort ambiental.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

Los invernaderos prototipo utilizados en la investigación son tipo cenital, de tres capillas y cuentan con sistema de ventilación pasiva (Figura 1). Para el análisis ambiental se usaron dos invernaderos, considerando el efecto que podría tener su diseño en la estratificación de temperatura cuando exista un cambio en la dirección del viento predominante. Se ajustaron los invernaderos validados por Aguilar-Rodríguez *et al.* (2020a); Aguilar-Rodríguez, Flores-Velázquez, Ojeda-Bustamante, Rojano-Aguilar e Iñiguez-Covarrubias (2020b), calibrándolos con datos de temperatura registrados por los sensores durante el mediodía.

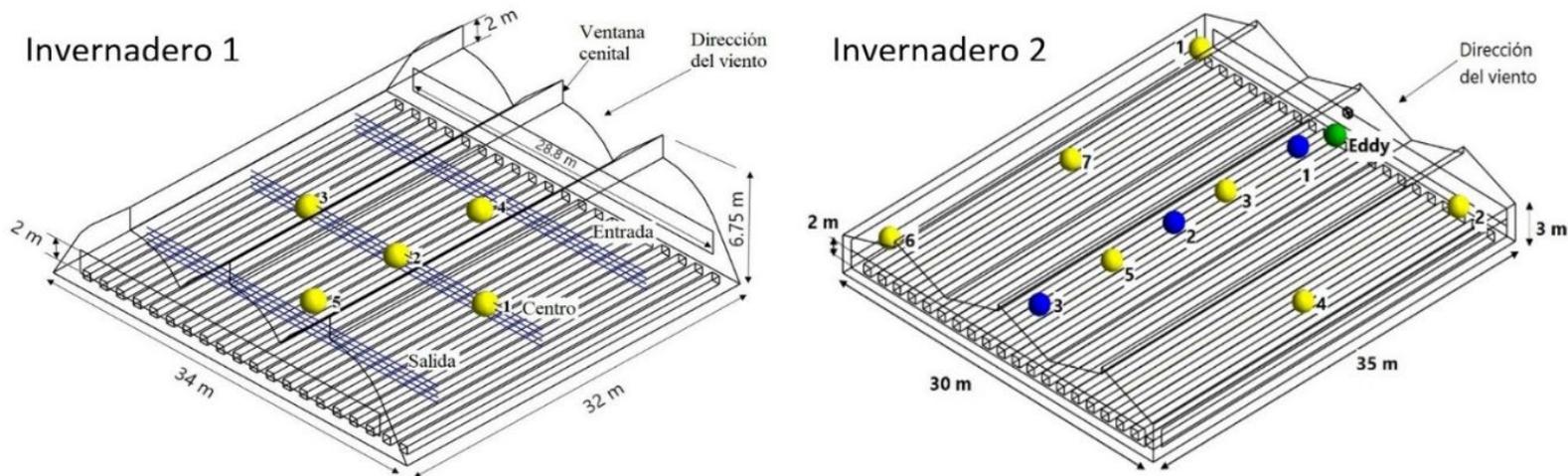


Figura 1. Dimensiones y ubicación de los sensores de temperatura (●), humedad (●) y Eddy (●) en los invernaderos experimentales.

Construcción de modelo computacional

La construcción y simulación de los modelos computacionales se llevó a cabo en ANSYS® Fluent®. Las geometrías se elaboraron en ANSYS® Workbench mediante SpaceClaim. El mallado se realizó en Meshing y cuenta con una calidad ortogonal de 0.96776 y una distorsión de $2.0639e^{-002}$ para el modelo 1. Para el modelo 2 se tiene una calidad ortogonal de 0.97283 y una distorsión de $1.9424e^{-002}$. Las condiciones aplicadas al flujo de aire dentro del invernadero se establecieron en función de los fenómenos físicos presentes y los datos registrados durante el periodo experimental (Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones de frontera de los modelos computacionales.

Condiciones de frontera	Método
Solucionador	Basado en presión
Estado	Estacionario
Modelo de viscosidad	Estándar k- ϵ (dos ecuaciones)
Ecuación de energía	Activada
Dominio de entrada	Velocidad de entrada
Dominio de salida	Presión de salida
Temperatura del aire	Constante
Velocidad del viento	Constante
Fuente de calor	Constante desde el suelo, hipótesis de Boussinesq
Condición térmica del suelo	Temperatura

Bases conceptuales de la modelación

La ecuación general de transporte (Ecuación (1)) que se resuelve numéricamente mediante CFD para calcular de forma explícita el campo de velocidad y temperatura asociado con un flujo en tres dimensiones en estado estacionario se puede describir en los siguientes términos generales (Senhaji, Majdoubi, Mouqalid, De, & Meknès, 2017):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial(U\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(W\phi)}{\partial z} = -\Gamma \Delta \phi^2 + S_{\phi} \quad (1)$$

Donde ϕ representa la concentración del término adimensional, es decir, momento, masa y energía; U , V y W son las componentes del vector de velocidad en las tres dimensiones (m s^{-1}); Γ , el coeficiente difusivo ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), y S_{ϕ} es el término fuente de la variable de interés que representa el gasto de momento debido al efecto de arrastre ejercido por el cultivo. Esta fuerza de arrastre puede expresarse como unidad de volumen de cobertura utilizando la Ecuación (2):

$$S_{\phi} = -LC_D v^2 \quad (2)$$

Donde v es la velocidad del aire (m s^{-1}); L , la densidad del dosel, y C_D es el coeficiente de arrastre establecido por Haxaire (1999) como 0.32. Para incluir el efecto de arrastre, el cultivo se considera como un medio poroso y puede describirse mediante la ecuación de Darcy-Forchacimer (Ecuación (3)):

$$S_{\phi} = - \left[\frac{\mu}{K} U + \right] \rho \frac{C_f}{K} U^2 \quad (3)$$

Donde U es la velocidad del viento; μ , la viscosidad dinámica del fluido; K , la permeabilidad de la zona porosa, y C_f es el coeficiente de pérdida suponiendo un momento no lineal. Al interior del invernadero, la

turbulencia se consideró utilizando el modelo *k-e* (Launder & Spalding, 1974), que dio origen a dos ecuaciones suplementarias.

Evaluación del modelo computacional

La evaluación de los modelos computacionales se llevó a cabo mediante un análisis estadístico entre los datos de temperatura simulados y experimentales. Para la evaluación del invernadero 1 y 2 se consideró un intervalo de tiempo de 12:30 a 13:00 h y de 14:30 a 15:00 h, respectivamente. El estudio estadístico se efectuó por medio de un análisis de varianza (ANOVA), con $p \leq 0.05$, para contrastar paramétricamente la diferencia de las variables en diferentes factores (Fisher, 1971).

Escenarios de simulación

La simulación del flujo de calor se realizó utilizando normales climatológicas mensuales de la estación meteorológica 16077 de Los Reyes, Michoacán (19° 35' N y 102° 28' O) como condición de frontera inicial para los escenarios simulados del invernadero 1 y 2 (Tabla 2).

Tabla 2. Temperatura (°C) mensual de los escenarios simulados.

Mes	Mínima	Media	Máxima
Enero	10.81	18.30	25.67
Febrero	11.08	19.07	27.06
Marzo	12.35	21.00	29.72
Abril	13.58	22.42	31.32
Mayo	15.18	23.47	31.80
Junio	16.43	22.48	28.68
Julio	15.52	20.75	26.11
Agosto	14.88	20.25	25.71
Septiembre	15.00	20.21	25.57
Octubre	14.33	20.68	26.87
Noviembre	12.95	19.77	26.49
Diciembre	11.61	18.14	24.67

Cálculo de GDC

Los GDC se estimaron considerando para su cálculo el promedio de la temperatura simulada en el invernadero con datos de temperatura media mensual (Ecuación (4)):

$$GDC = T_{prom} - T_{base} \quad (4)$$

Donde el término T_{prom} es la temperatura promedio al interior del invernadero y T_{base} es la temperatura donde el proceso metabólico del tomate es mínimo de 10 °C (Zotarelli *et al.*, 2009).

La acumulación de GDC empleada para calcular la duración del ciclo de tomate bajo invernadero se estimó con los resultados de la investigación de Ardila *et al.* (2011), en donde son necesarios 1 398.5 GDC desde el trasplante hasta el inicio de cosecha. Cabe recordar que los GDC pueden ser usados como indicador numérico para manejar fechas de cultivo y dimensiones del invernadero, tal y como lo demostraron Aguilar-Rodríguez *et al.* (2020a), en donde es posible establecer la duración del ciclo del cultivo de tomate en función de la temperatura del invernadero.

Resultados y discusión

La evaluación del modelo computacional se llevó a cabo estadísticamente mediante la correlación de los datos de temperatura registrados por los sensores en el invernadero 1 y 2, y los datos simulados. En la Tabla 3 se observa que los valores de temperaturas registrados y simulados muestran una aproximación entre los valores. La correlación de los datos se midió utilizando un análisis estadístico ANOVA, con un nivel de significancia del 0.05, considerando que si el nivel de significancia es menor al valor de probabilidad P (nivel de significancia < valor P) no hay diferencia significativa entre las variables registradas y simuladas (Tabla

4). Por lo tanto, los modelos evaluados se pueden usar en las simulaciones.

Tabla 3. Datos de temperatura (°C) en los modelos evaluados.

Invernadero 1			Invernadero 2		
Sensor	Experimental	Simulado	Sensor	Experimental	Simulado
1	25.50	24.90	1	33.83	29.34
2	25.70	25.50	2	31.55	28.54
3	28.50	25.10	3	33.10	31.89
4	26.30	23.90	4	32.32	31.82
5	25.70	26.60	5	32.67	31.72
			6	33.81	33.06
			7	32.97	34.18
			Eddy	31.09	29.55

Tabla 4. Correlación de temperatura entre el nivel de significancia y el valor *P*.

Invernadero 1	Invernadero 2
0.050 < 0.146	0.050 < 0.090

Distribución espacial de temperatura de los escenarios simulados

La Figura 2a muestra que no existe diferencia significativa en la temperatura promedio simulada con datos de temperatura media mensual a 2 m de altura en el interior del invernadero 1 y 2, considerando la dirección de viento predominante obtenida durante el registro de datos (Figura 1). Sin embargo, cuando la dirección del viento cambia (Figura 2b) existe un gradiente térmico promedio de 1.2 °C entre ambos invernaderos. El cambio en la dirección del viento genera un aumento de 1.78 °C para el invernadero 1 y de 0.58 °C en el invernadero 2, en relación con los resultados de la Figura 2a. Los resultados coinciden con lo descrito por Ntinis *et al.* (2017); Kuroyanagi, (2017); Cemek *et al.* (2017), y Zeroual *et al.* (2018), en donde se establece que un factor clave en el desarrollo ambiental de un invernadero de media y baja tecnología es la velocidad del viento, su dirección y el diseño del invernadero.

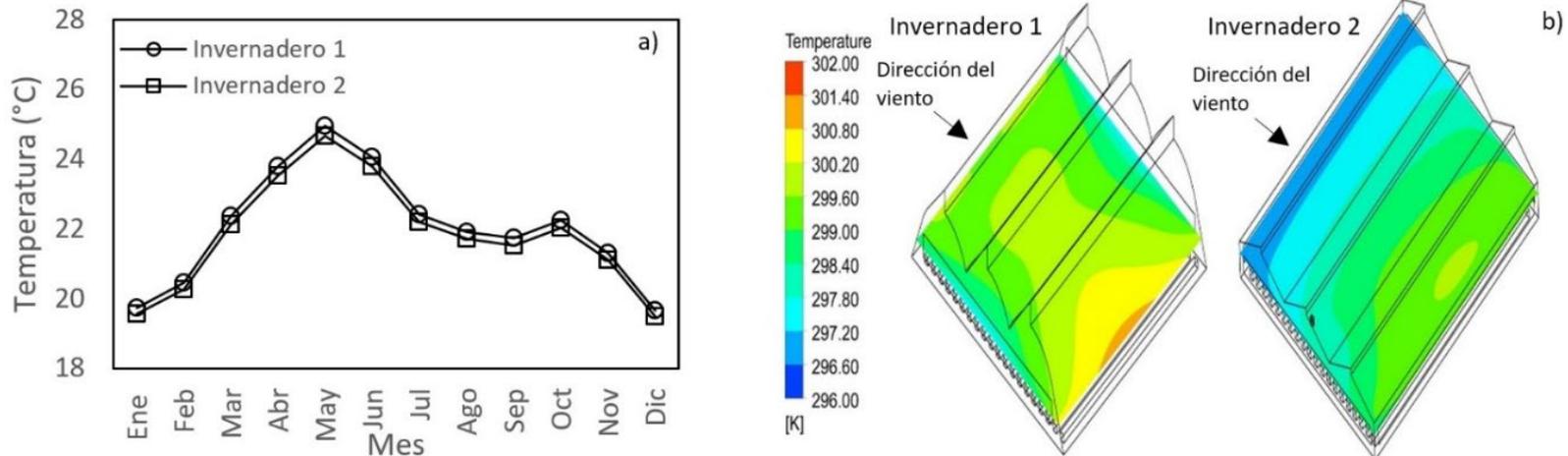


Figura 2. Distribución de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) a 2 m del suelo en el invernadero 1 y 2 durante: a) todo el año; b) mes de mayo con un cambio en la dirección del viento predominante.

El cambio en la dirección del viento predominante en el invernadero 1 ocasiona que el aire al interior del invernadero sea desplazado por la diferencia de densidades entre el aire caliente cercano al suelo y el aire dentro del invernadero, generando recirculaciones en cada nave (Figura 3a). En el invernadero 2, el desplazamiento de aire ocurre por el intercambio de aire entre el exterior y el interior (Figura 3b), mejorando la tasa de renovación de aire y la distribución de temperaturas en el invernadero (Santolini *et al.*, 2018).

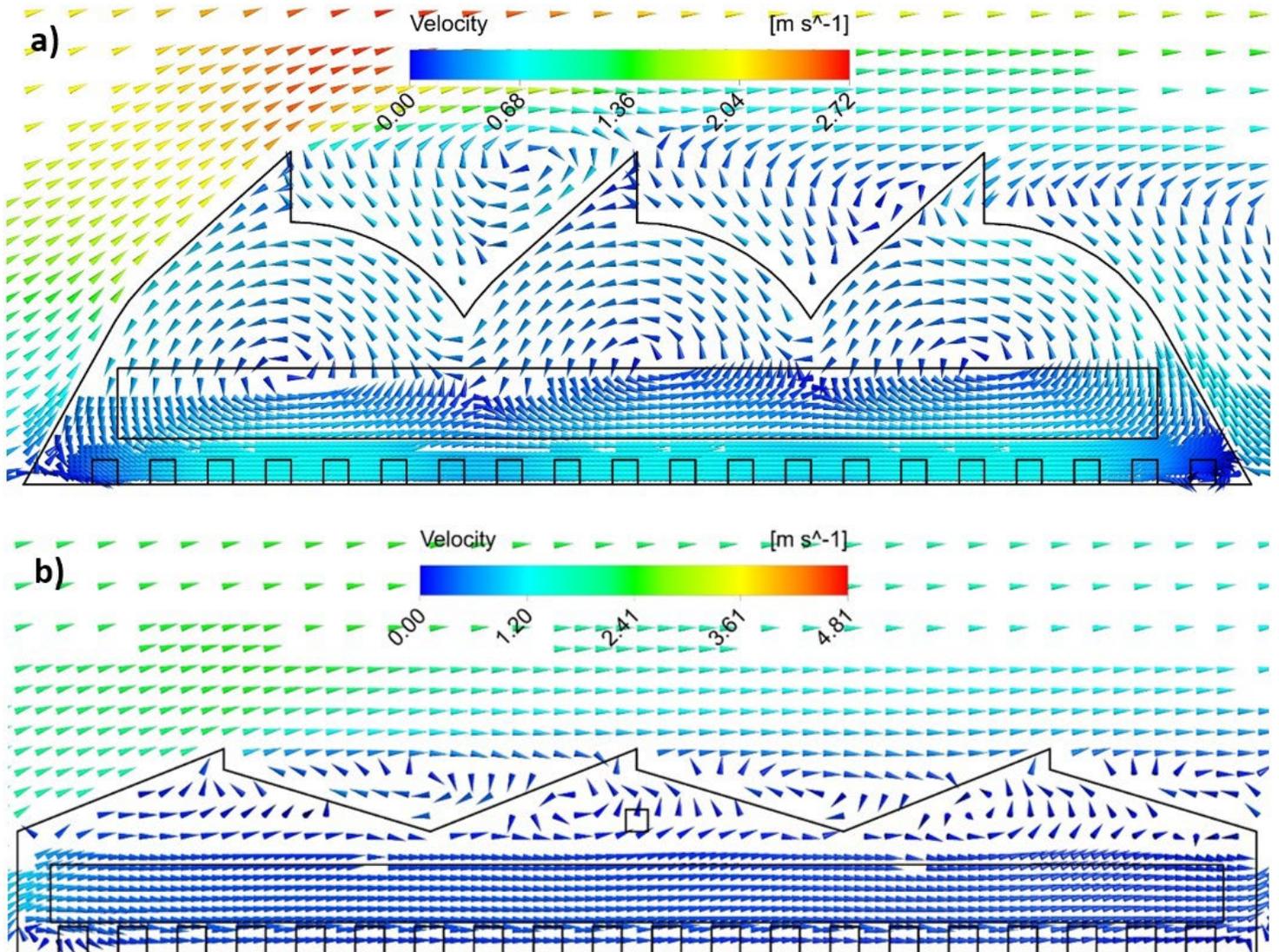


Figura 3. Velocidad del viento (m s^{-1}) en un plano longitudinal durante el mes de mayo en el invernadero 1 (a) y en el invernadero 2 (b).

Los resultados simulados del invernadero 2 presentaron mejores condiciones ambientales que en el invernadero 1 (Figura 2b y Figura 3).

Por tal motivo, se estableció que el modelo del invernadero 2 fuese utilizado para simular los diferentes escenarios (Tabla 2). Los resultados de las simulaciones con temperatura mínima mensual mostraron que durante el invierno es posible contar con un confort térmico para el tomate con temperaturas entre los 12.31 °C.

Las simulaciones con datos de temperatura media mensual para mayo y diciembre —considerados los meses con temperaturas medias más altas y bajas del año (Figura 4)— muestran que la temperatura en el invernadero no es homogénea, pues existe un gradiente térmico de hasta 4 °C entre la zona de barlovento y sotavento. No obstante, la temperatura promedio en el invernadero está dentro del umbral para el tomate (de 10 a 30 °C). Los resultados de la Figura 4 poseen correlación con lo descrito por Chu, Lan, Tasi, Wu y Yang (2017), y Tong, Christopher y Zhang (2018), sugiriendo que el gradiente térmico entre el exterior e interior del invernadero está en función de la tasa de renovación de aire, derivado de la obstrucción generada por la malla antiinsectos, el cultivo, la velocidad del viento y la longitud del invernadero.

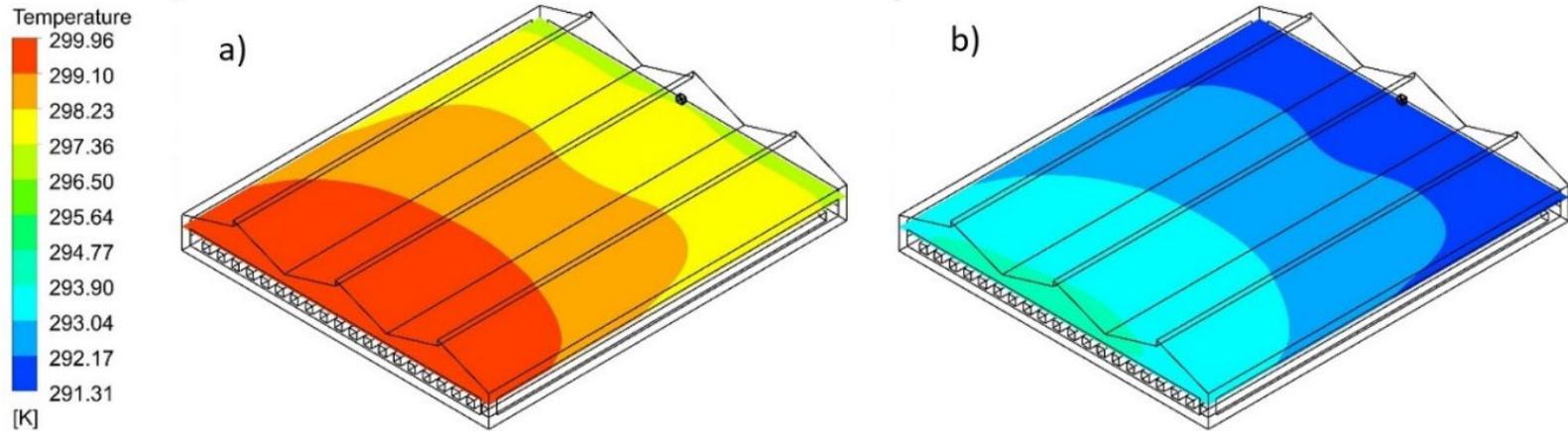


Figura 4. Distribución de temperatura (K) simulada a 2 m de altura en el invernadero 2, con datos de temperatura media mensual durante mayo (a) a diciembre (b).

Los resultados simulados con temperatura máxima mensual durante marzo, abril, mayo y junio presentan temperaturas en el invernadero superiores a los 30 °C (Figura 5), derivadas de las altas temperaturas exteriores y longitud mayor del invernadero a seis veces su altura (Teitel & Wenger, 2014; Chu *et al.*, 2017; Tong *et al.*, 2018); esto ocasiona una reducción de la tasa de renovación de aire y vuelve necesaria la evaluación de los costos energéticos para la implementación de sistemas de control climático durante ciertas horas del día (Bournet & Boulard, 2010; Lee, Lee, & Kim, 2018), a fin de producir todo el año y reducir los posibles problemas presentes por temperaturas fuera del umbral para el tomate.

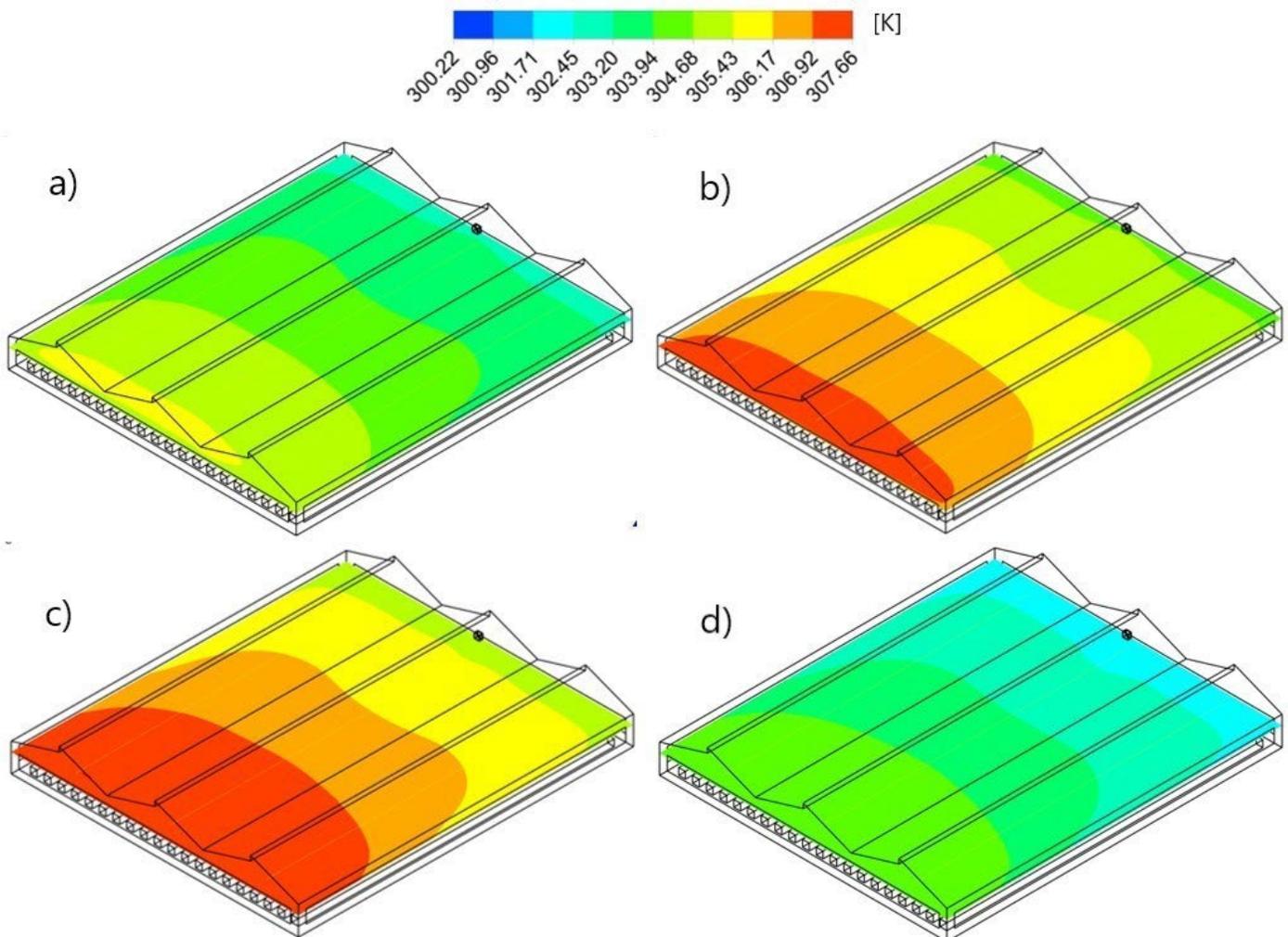


Figura 5. Distribución de temperatura (K) simulada a 2 m de altura en el invernadero 2 con datos de temperatura máxima mensual durante marzo (a), abril (b), mayo (c) y junio (d).

La estimación de GDC se hizo con datos de temperatura promedio de las simulaciones del invernadero 2, dado que presenta un menor gradiente térmico cuando la dirección del viento predominante cambia.

La acumulación de GDC se calculó mediante la ecuación utilizada por Aguilar-Rodríguez *et al.* (2020a). Los resultados de las simulaciones (Figura 6) muestran un gradiente de 6 GDC durante el mes con temperaturas más bajas y altas del año. Durante mayo, la acumulación de GDC es mayor que la de diciembre, manteniendo una acumulación promedio diaria de 14.5 GDC, mientras que en diciembre esta acumulación promedio no supera los 9.58 GDC.

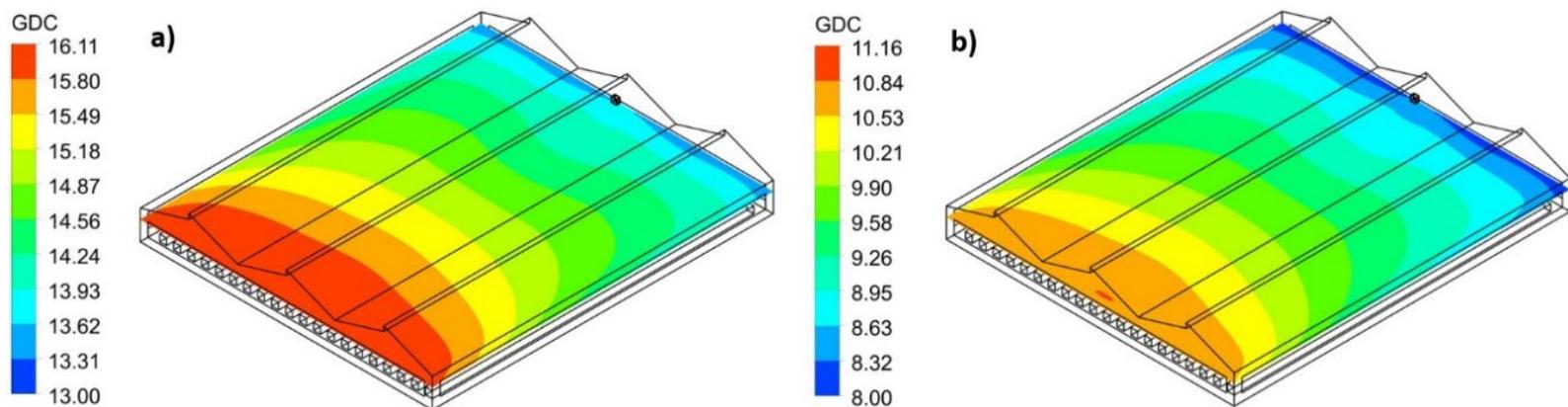


Figura 6. GDC simulados en el invernadero 2 con datos de temperatura media mensual durante mayo (a) y diciembre (b).

La estimación de GDC simulados en el invernadero 2 muestra que anualmente se tiene una acumulación de 4 322.17 GDC, suficiente para tres ciclos de tomate al año (Figura 7), según lo reportado por Ardila *et al.* (2011). El mes con mayor acumulación de GDC durante mayo, con 455 GDC; la mayor acumulación de GDC ocurre en primavera, donde la temperatura simulada al interior del invernadero supera los 30 °C y donde

se requiere mejorar la renovación de aire para reducir el gradiente térmico entre el exterior y el interior.

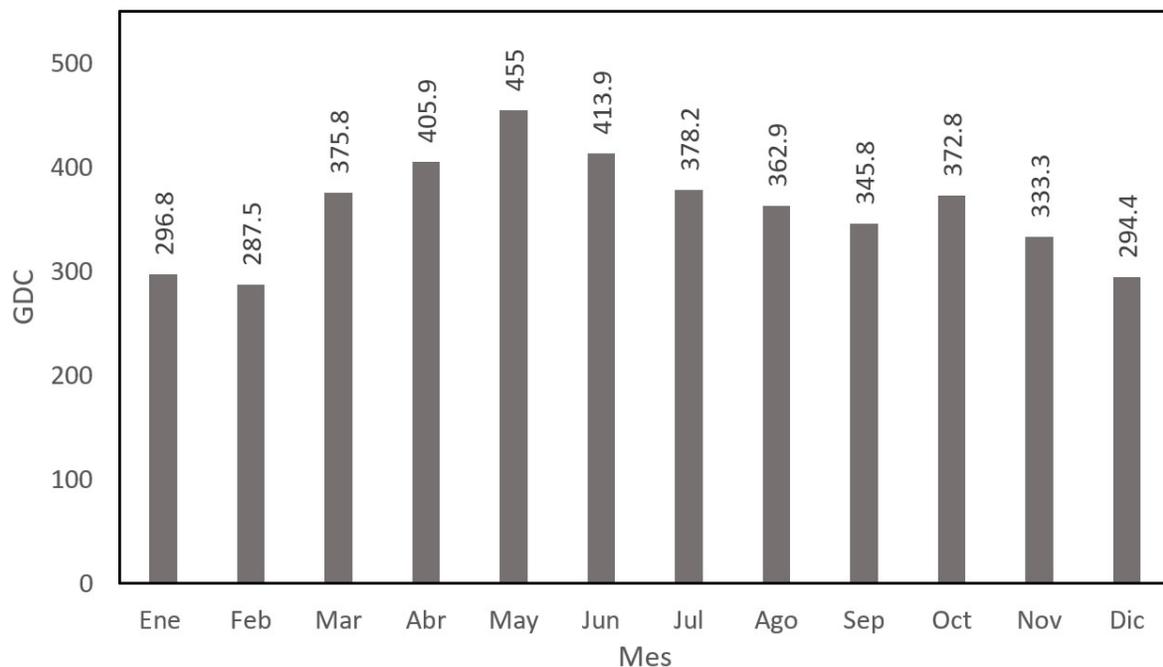


Figura 7. Acumulación de GDC mensual al interior del invernadero 2, simulado con datos de temperatura media mensual.

Sagarpa, en 2012, reportó que en Michoacán la temporada de trasplante más significativa para el tomate es en agosto y principios de septiembre, con tiempo de cosecha entre noviembre y diciembre (Sagarpa, 2012). El ciclo de primavera-verano en Michoacán comienza con el trasplante a partir de la segunda quincena del mes de febrero, con una variedad de tomate intermedia o tardía, y culminan en la última semana de febrero o en la primera de marzo con variedades más

precoces, a fin de cosechar a partir de la segunda quincena del mes de abril y culminar hasta la primera quincena del mes de julio. El ciclo de otoño-invierno comienza con el trasplante a partir de la tercera semana del mes de julio y hasta el mes de agosto, para iniciar cosecha a inicios de noviembre.

Los resultados de la acumulación de GDC obtenidos de las simulaciones muestran que dado los requerimientos térmicos es posible obtener un ciclo de cultivo de tomate en un promedio de cuatro meses. La Tabla 5 presenta la duración del ciclo del cultivo de tomate considerando la acumulación de GDC y los días necesarios para su desarrollo; muestra semejanza en cuanto a duración del ciclo de tomate, según lo reportado por Sagarpa en 2012. En los Reyes, dada la acumulación de GDC, es posible obtener dos ciclos de tomate sin problema alguno: uno durante primavera-verano y otro durante otoño-invierno, con tiempo suficiente para la cosecha y para la preparación del invernadero entre temporadas.

Tabla 5. Días necesarios por ciclo de cultivo de tomate en Los Reyes de acuerdo con la acumulación de GDC durante las fechas más representativas de siembra en el estado de Michoacán.

Mes	Otoño-invierno		Primavera-verano	
	Días	GDC	Días	GDC
Enero				
Febrero			14	143.75
Marzo			45	519.55
Abril			75	925.45
Mayo			106	1 380.45
Junio			107	1 398.5
Julio				
Agosto	31	362.9		
Septiembre	61	708.7		
Octubre	92	1 081.5		
Noviembre	121	1 398.5		
Diciembre				

En Los Reyes, Michoacán, la principal actividad económica es la agricultura; es primer lugar en producción de frutillas a nivel nacional. Sin embargo, derivado de los problemas presentes en la región y el abandono de tierras, es necesario buscar alternativas de producción para reutilizar las zonas abandonadas. Los resultados de las simulaciones y la acumulación de GDC muestran que el tomate bajo invernadero con mejora de sustrato es una opción viable como cultivo alternativo de

producción; es posible cultivar dos ciclos de tomate bajo invernadero. Este tipo de sistema de cultivo, conocido como hidropónico, además de incrementar la producción, permite la reutilización de tierras abandonadas, dado que el tomate no tiene contacto con la tierra enferma.

Conclusiones

Las simulaciones muestran que bajo las condiciones ambientales reportadas en las estaciones meteorológicas seleccionadas en Michoacán, se tiene un rango de temperatura media mensual dentro del invernadero que oscila entre los 19 y 25 °C durante el año. El salto térmico en esa región permite acumular más de 4 000 GDC, lo que permitiría dos ciclos de tomate al año, considerando el tiempo para la cosecha y la preparación del invernadero. Las simulaciones con temperatura máxima mensual muestran que durante los meses de marzo a junio es posible requerir sistema auxiliar de ventilación y un adecuado diseño del invernadero para mantener un confort térmico para el tomate.

Agradecimientos

Los autores agradecen al posgrado en Ciencias y Tecnología del Agua del Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA) por las facilidades otorgadas para el análisis de este trabajo durante la elaboración de la tesis del doctorando Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez.

Referencias

- Aguilar-Rodríguez, C. E., Flores-Velázquez, J., Rojano-Aguilar, F., Ojeda-Bustamante, W., & Iñiguez-Covarrubias, M. (2020a). Estimación del ciclo de cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en invernadero, con base en grados días calor (GDC) simulados con CFD. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(4), 38-68. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-04-02>
- Aguilar-Rodríguez, C. E., Flores-Velázquez, J., Ojeda-Bustamante, W., Rojano-Aguilar, F., & Iñiguez-Covarrubias, M. (2020b). Valuation of the energy performance of a greenhouse with an electric heater using numerical. *Processes*, 8(5), 1-13. DOI <https://doi.org/10.3390/pr8050600>
- Ardila, G., Gustavo-Fischer, G., & Balaguera-López, H. E. (2011). Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en tiempo fisiológico bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícola*, 5(1), 44-56. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2011v5i1.1252>
- Bartzanas, T., Boulard, T., & Kittas, C. (2004). Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, 88, 479-490.

- Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2018). Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronics Agriculture*, 149, 54-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>
- Bouhoun-Ali, H., Bournet, P. E., Cannavo, P., & Chantoiseau, E. (2017). Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. *Computers and Electronics Agriculture*, 149, 26-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.021>
- Boulard, T., Roy, J. C., Pouillard, J. B., Fatnassi, H., & Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158, 110-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001>
- Bournet, P., & Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computer and Electronic Agriculture*, 74, 195-217.
- Castilla, N. (2004). *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo* (2^a ed.). Madrid, España: Editorial Mundiprensa.
- Cemek, B., Atiş, A., & Küçüktopçu, E. (2017). Evaluation of temperature distribution in different greenhouse models using computational fluid dynamics (CFD). *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*, 32, 54-54. DOI: <https://doi.org/10.7161/omuanajas.289354>

- Chu, C. R., Lan, T. W., Tasi, R. K., Wu, T. R., & Yang, C. K. (2017). Wind-driven natural ventilation of greenhouses with vegetation. *Biosystems Engineering*, 164, 221-234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.008>
- Contreras-Pérez, M., Santoyo-Pizano, G., De-los-Santos-Villalobos, S., Gutiérrez-García, M. A., Orozco-Mosqueda, M. C., & Rocha-Granados, M. C. (2019). First report of Lasiodiplodia on blackberry plants (*Rubus* subgenus *Eubatus*) in the Michoacan state, Mexico. *Mexican Journal of Phytopathology*, 37(3), 1-7.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Crop water requirements (paper 24)*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization.
- Fernández-Pavía, S. P., Rodríguez-Alvarado, G. R., Gómez-Dorantes, N., Gregorio-Cipriano, M. R., & Fernández-Pavía, Y. L. (2012). Enfermedades en plantas en el estado de Michoacán. *Biológicas*, 14(2), 75-89.
- Fisher, R. A. (1971). Statistical methods for research workers. *Biometrics*, 27, 1106. DOI: <https://doi.org/10.2307/2528855>
- Haxaire, R. (1999) *Caractérisation et Modélisation des écoulements d'air dans une serre* (Thèse de Docteur en Sciences de l'Ingénieur), Université de Nice, Sophia Antipolis, 148 pp.
- Kuroyanagi, T. (2017). Investigating air leakage and wind pressure coefficients of single-span plastic greenhouses using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 163, 15-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.004>

- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269-289.
- Lee, S. Y., Lee, I. B., & Kim, R. W. (2018). Evaluation of wind-driven natural ventilation of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land. *Biosystems Engineering*, 171, 120-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.015>
- Mesmoudi, K., Meguallati, K. H., & Bournet, P. E. (2017). Effect of the greenhouse design on the thermal behavior and microclimate distribution in greenhouses installed under semi-arid climate. *Heat Transfer - Asian Research*, 46(8), 1294-1311. DOI: <https://doi.org/10.1002/htj.21274>
- Ntinias, G. K., Shen, X., Wang, Y., & Zhang, G. (2017). Evaluation of CFD turbulence models for simulating external airflow around varied building roof with wind tunnel experiment. *Building Simulation*, 11(5), 115-123. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0369-9>
- Rangel, R. J., & Silvas, J. R. (1987). Fenología del tomate en tres fechas de siembra. *Avances de investigación en hortalizas en el estado de Sinaloa. SARH-INIFAP-CAEVACU*, 12, 45-47.
- Rodríguez, W., & Flórez, V. (2006). Comportamiento fenológico de tres variedades de rosas rojas en función de la acumulación de la temperatura. *Agronomía Colombiana*, 24, 247-257.

- Sagarpa, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2012). *Sistema Producto Jitomate de Michoacán*. Recuperado de http://dev.pue.itesm.mx/sagarpa/estatales/EPT%20COMITE%20ISTEMA%20PRODUCTO%20TOMATE%20MICHOACAN/PLAN%20RECTOR%20QUE%20CONTIENE%20PROGRAMA%20DE%20TRABAJO%202012/PR_JITOMATE_MICHOACAN_2012.pdf
- Santolini, E., Pulvirenti, B., Benni, S., Barbaresi, L., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2018). Numerical study of wind-driven natural ventilation in a greenhouse with screens. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 41-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.027>
- Senhaji, A., Majdoubi, H., Mouqalid, M., De, E., & Meknès, E. (2017). Solar distribution in a greenhouse at different crops orientation during production season. *13ème Congrès de Mécanique*, 13-15.
- Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83, 21-38.
- SIAP & Sagarpa, Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera-Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2019). *Atlas agroalimentario 2018*. Recuperado de https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018
- Teitel, M., & Wenger, E. (2014). Air exchange and ventilation efficiencies of a monospan greenhouse with one inflow and one outflow through longitudinal side openings. *Biosystems Engineering*, 119, 98-107.

- Tesi, R. (2001). *Medios de protección para la hortofloro-fruticultura y el viverismo*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Tong, G., Christopher, D. M., & Zhang, G. (2018). New insights on span selection for Chinese solar greenhouses using CFD analyses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 3-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.031>
- Trudgill, D. L., Honek, A., Li, D., & Van-Straaalen, N. M. (2005). Thermal time: Concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, 146(1), 1-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.04088>
- Zeroual, S., Bougoul, S., & Benmoussa, H. (2018). Effect of radiative heat transfer and boundary conditions on the airflow and temperature distribution inside a heated tunnel greenhouse. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 59(6), 1008-1014. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894418060068>
- Zotarelli, L., Scholberg, J. M., Dukes, M. D., Muñoz-Carpena, R., & Icerman, J. (2009). Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agriculture Water Manage*, 96, 23-34.