



## **ESTABLECIMIENTO DE LOS GRADOS DÍAS DE CRECIMIENTO (DGC) COMO INDICADOR PARA EL MANEJO DEL CICLO DEL CULTIVO DE JITOMATE (*ESCULENTUM MILL*) EN UN INVERNADERO**

**Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez<sup>1</sup>; Jorge Flores Velázquez<sup>1</sup>; Waldo Ojeda Bustamante<sup>1</sup>;  
Fernando Rojano<sup>2</sup>; Mauro Íñiguez Covarrubias<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

cruz.aguilar@posgrado.imta.edu.mx- -3541013901 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup> Instituto de Ecología. Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa 91070, Veracruz, México.

### **Resumen**

El propósito del invernadero es el acondicionamiento climático de un espacio, dictaminado por el cultivo presente, con cierta codependencia con el ambiente exterior, por tal motivo, se deduce que la calidad y rendimiento dependerá del tipo de invernadero, manejo y de los factores ambientales externos. El objetivo de este trabajo es determinar la efectividad térmica de los invernaderos basados en los grados días de crecimiento (GDC) como un indicador de eficiencia térmica. El modelo utilizado para el cálculo grados días de crecimiento está en función de la  $T_{min}$  y  $T_{max}$  de desarrollo del cultivo y la temperatura promedio de la temperatura media diaria en el invernadero. El alcance de este trabajo es establecer el uso de estaciones meteorológicas y Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como herramienta para la estimación de la temperatura en el invernadero y auxiliar en el cálculo GDC. Los resultados muestran correlación entre los valores de temperaturas registrados por los sensores en el experimento, y las temperaturas obtenidas en los modelos computacionales. Los GDC calculados, presentan un error porcentual menor al 12% entre los modelos, demostrando la capacidad del modelo CFD para predecir la distribución de la temperatura del aire.

**Palabras claves:** Grados días de crecimiento, estaciones meteorológicas, CFD, invernaderos.



## Introducción

El incremento de la población durante los últimos años ha generado un aumento en la demanda de productos agrícolas, ocasionando la mejora en la manera de producir, incrementando el rendimiento, calidad y cantidad de los cultivos. Una manera de mejorar la cantidad y calidad es mediante el uso de invernaderos, los cuales tienen la finalidad de restringir fenómenos ambientales externos, manteniendo un mayor control sobre la producción.

México cuenta con 25814 unidades de producción de AP, de las cuales 65% son invernaderos, 10% macrotúneles, 10% microtúnel y 15% son casa sombra, techo sombra o pabellón, siendo la superficie bajo invernadero la más representativa (SIAP, 2017). Castilla (2004) establece una relación entre la temperatura y el desarrollo del tomate (*Esulentum Mill*), considerando la temperatura óptima durante el día de 22-26 °C y durante la noche de 13-16 °C. Heuvelink (1989), De Koning (1990), Korner y Challa (2003) establecen que la integración diaria de la temperatura del tomate es mejor que la oscilación diaria de temperatura, estableciendo que el enfoque de integración térmica puede ser aplicado a invernaderos y puede ser utilizado como un índice de la eficiencia.

Los grados días son una medida indirecta del crecimiento de muchos organismos y representa la integración de la temperatura entre la cual, el organismo se encuentra activo y tiene su máximo desarrollo. El concepto de grados días de crecimiento se obtuvo como resultado de diferentes observaciones como lo menciona Neild y Smith en 1997 donde describen que las plantas no se pueden desarrollar cuando la temperatura ambiental es menor que la temperatura de basal. Yang, Logan y Coffey (1995) establecieron la  $T_{c-min}$  como la temperatura en la cual existe una menor acumulación de días grado de desarrollo. Ojeda, Sifuentes, Slack y Carrill (2004) estimaron el valor de temperatura diaria  $i$  de la variable grado (°D) en relación con las temperaturas mínimas y máximas del aire ( $T_{c-min}$  y  $T_{c-max}$ ) donde el cultivo se desarrolla y donde  $\bar{T}_i$  representa el promedio aritmético de la temperatura media diaria.

Rodríguez y Flórez (2006) establecen el valor de acumulación de grados día de calor de la siguiente manera:

$$GDC = \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_{base} \quad (1)$$

Donde la  $T_{base}$  es la temperatura donde el proceso metabólico es mínimo considerado de 10 °C para el jitomate (Zotarelli et al. 2009). Ardila, Fischer y Balaguera (2011) establecieron una equivalencia entre los días después del trasplante (DDT) y grados días de crecimiento (GDC) del jitomate (Tabla 1).



**Tabla 1.** Equivalencia de DDT y GDC

<b>DDT</b>	<b>GDC</b>
60	632.5
75	797.5
90	948.5
105	1100.5
120	1247.5
135	1398.5

El estudio de los grados días ha permitido asociar las necesidades hídricas de los cultivos a su desarrollo, tal como lo demuestran Íñiguez, Ojeda, Diaz y Sifuentes (2014) quienes integraron de forma directa el valor puntual de grados días desarrollo de las etapas fenológicas con las necesidades hídricas del maíz y la duración de las lluvias.

Doorenbos y Pruitt (1977) establecen que para el cálculo de los grados días, los valores de temperatura deben ser locales debido a la variación temporal y espacial que está en función del ambiente local, de la fase y de la variedad del cultivo. La información meteorológica llega a ser de utilidad para el análisis del tiempo, especialmente cuando es necesario conocer el comportamiento de las temperaturas, lluvias y ambiente en general, con la finalidad de establecer aplicaciones asociadas a la agronomía, hidrología y construcción. En la agronomía la información meteorológica es útil cuando se requiere conocer el mejor periodo para cultivar y en el cuál se tiene menos problemas.

Daly (2006) menciona que una distancia establecida de 100 km entre estaciones, representan una insuficiencia para el establecimiento de los factores climáticos que afectan cada región y que para zonas montañosas o costeras la distancia de representación de las estaciones climatológicas disminuye a menos de 3 km. En México se cuenta con aproximadamente 3300 estaciones meteorológicas, si se considera que cada estación representa un área de 100 km<sup>2</sup>, las estaciones cubrirían una superficie de 330000 km<sup>2</sup> que representaría 17 % de la superficie del territorio nacional. Para la selección de las estaciones, Camargo y Hubbar (1999) establecen que una distancia entre 30 km en superficie similar, representan un 90 por ciento de que la variable sea igual a la del municipio de estudio.

CFD es útil para simular situaciones en las que el flujo de aire es muy importante, siendo el caso de los invernaderos, en el cual el microclima interior depende de los factores ambientales externos, su ventilación, el tipo de cultivo y de los equipos de control climático, por lo tanto, la comprensión de los fenómenos ambientales es necesaria para estudiar correctamente el entorno del invernadero.

Piscia, Muñoz, Panades y J. Montero (2015) desarrollaron un modelo de acoplamiento CFD y simulaciones de balance de energía con la finalidad de estudiar el control de humedad en invernaderos sin calefacción. En uno de los casos de estudio, se calcularon los coeficientes convectivos para diferentes condiciones externas, mostrando que los coeficientes de convección dependen de la tasa de ventilación y no sufren cambio debido a las variaciones de la temperatura del cielo como se pensaba.



Boulard, Roy, Pouillard, Fatnassi y A. Grisey (2017) determinaron que mediante CFD, es posible desarrollar un modelo para predecir la distribución de temperatura, vapor de agua y dióxido de carbono en un invernadero. Bouhoun, Bournet, Cannavo y E. Chantoiseau (2017) mostraron la adaptabilidad de CFD para predecir correctamente la transpiración, las temperaturas del aire y la humedad dentro del invernadero. Cemek, Atis y Küçüktopçu (2017) establecieron el uso de CFD como herramienta de diseño de invernaderos para atenuar los factores ambientales de las regiones, considerando las temperaturas obtenidas de las estaciones meteorológicas como la temperatura exterior del invernadero. Mesmoudi, Meguallati y Bournet (2017) destacaron el efecto que tienen las propiedades de los materiales de cubierta y el diseño en la energía al interior del invernadero. Subin, Lourence, Karthikeyan y Periasamy (2018) establecieron la importancia en la buena selección del material de cubierta para reducir los gradientes de temperatura en un invernadero durante el día y mantener una mayor energía durante la noche.

El objetivo de este trabajo es determinar la efectividad térmica en un invernadero considerando el uso de CFD y las temperaturas medias mensuales representativas del municipio de Navolato y de Texcoco. Los gradientes térmicos al interior del invernadero obtenidos de la simulación se utilizaron para calcular los GDC. Los resultados de los GDC permiten para establecer una comparación entre cultivar a cielo abierto y bajo invernadero, el tiempo requerido por ciclo de cultivo de jitomate en municipios con diferencias climáticas y el establecimiento de la mejor temporada para cultivar.

## **Materiales y Métodos**

### **Sitio experimental**

El invernadero se encuentra situado en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez en San Luis Potosí a 1850 msnm. Invernadero tipo cenital de tres naves con ventilación natural (ventanas laterales y cenitales) y cortinas retractables en cada ventana. Cultivo a una altura de 60 cm y 20 camas distribuidas en tres naves, área cubierta de 1088 m<sup>2</sup> por polietileno translucido, altura de 6.75 m y dimensiones laterales de 32 x 34 m (Figura 1).

El invernadero fue instrumentado con 5 sensores (Vaisala HMP50, Woburn, MA, USA) ubicados a una altura de 2.5 m sobre el suelo y distribuidos en las tres naves para medir la temperatura y la humedad relativa durante el mes de julio monitoreando y registrando datos cada 10 minutos y almacenándolos en un CR1000, Campbell Scientific, Inc.

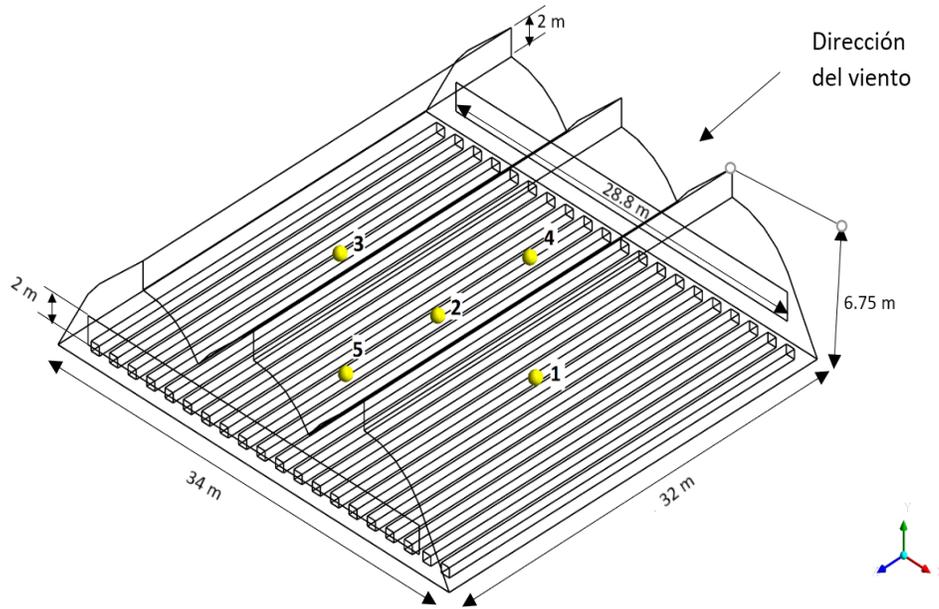


Figura 1. Dimensiones del modelo computacional y distribución de los sensores

### Modelo computacional

El modelo computacional se realizó en ANSYS FLUENT, resolviendo el modelo en estado estacionario de las ecuaciones de momento, masa y energía acopladas a un invernadero, el cultivo se consideró como un medio poroso y el modelo de turbulencia usado para la simulación fue k- $\epsilon$  estándar (Tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de frontera del modelo computacional

Condiciones de frontera	Método	Valor
<b>Solver</b>	Basado en presión (Pressure-Based)	
<b>Estado</b>	Estacionario (Steady)	
<b>Modelo de viscosidad</b>	Estándar k- $\epsilon$ (2 ecuaciones)	
<b>Ecuación de energía</b>	Activada	
<b>Dominio de entrada</b>	Velocidad de entrada (Velocity inlet)	
<b>Dominio de salida</b>	Presión de salida (Pressure outlet)	
<b>Temperatura del aire</b>	Perfil constante	292.04 (K) 293.44 (K)
<b>Velocidad del viento</b>	Perfil constante	3.85 (m s <sup>-1</sup> )
<b>Tratamiento de medios porosos</b>	Malla: Porous jump	
	Cultivo: Porous Zone	
<b>Porous jump</b>	Face permeability	2.86e <sup>-9</sup> (m <sup>2</sup> )
	Porous medium thicknes	0.000372 (m)
	Pressure jump coefficient	11131.45 (1 m <sup>-1</sup> )
<b>Porous zone</b>	Inertial Resistance	1.92 (1 m <sup>-1</sup> )



	Fluid porosity	0.017
<b>Fuente de calor</b>	Constante desde el suelo, Hipótesis de Boussinesq	
<b>Condición térmica del suelo</b>	Flujo de calor	200 (w m <sup>-2</sup> )
	Número de elementos	757147291315
	Numero de nodos	
<b>Malla</b>	Maximum Aspect Ratio	30.0544
	Minimum Orthogonal Quality	0.0627712

Se estableció la ecuación de transporte clásica utilizada para representar la masa, la velocidad y la temperatura dentro del invernadero.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + s_\phi \quad (2)$$

El modelo de turbulencia  $k - \varepsilon$  estándar, para su solución, establece las siguientes ecuaciones sobre la ecuación de transporte para cada derivada física en función del término fuente.

Masa

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j) = 0 \quad (3)$$

Momento

$$\frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\sigma}_{ij}) + \bar{\rho} \sigma_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_i' u_j') + s_m \quad (4)$$

Energía turbulenta y cinética

$$\frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \mu_t s^2 - \rho \varepsilon + s_k \quad (5)$$

Disipación de la energía turbulenta y cinética

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\bar{\rho} \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j \varepsilon) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{1\varepsilon} \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \left( \mu_t s^2 - c_{3\varepsilon} g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) - c_{2\varepsilon} \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \varepsilon^2 + s_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$



La ecuación determinada por Wilson (1985) se usó para estudiar el coeficiente de arrastre del cultivo simbolizado por el termino fuente  $S_\phi$  de la ecuación de Navier Stokes, el cual es representado en términos de volumen unitario de la cubierta.

$$S_\phi = -LC_D v^2 \tag{7}$$

### Evaluación

Para la evaluación se seleccionó un método paramétrico análisis de varianza (ANOVA) para comparar la diferencia de las variables en diferentes factores (Tabla 3), estableciendo las siguientes hipótesis:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_0 = \mu_1 \neq \mu_2 = \mu_3$$

**Tabla 3.** Tabla de ANOVA para comparación de medias

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f calculada
Tratamientos	$n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2$	k-1	$s_1^2 = \frac{n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2}{k - 1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
Error	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	k(n-1)	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2}{k(n - 1)}$	
Total	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	Kn-1		

### Grados días de crecimiento

El modelo seleccionado para el cálculo de grados días fue utilizado por Ojeda, Sifuentes, Slack y Carrillo (2004) considerando las temperaturas umbral y el promedio de la temperatura media diaria. El modelo se acopló al cultivo de jitomate y el valor de la temperatura media diaria se estableció como el promedio de las temperaturas distribuidas al interior del invernadero resultado de la simulación.

$$\begin{aligned} \text{°D}_i &= \bar{T}_i - T_{c-\min} \quad \text{si } \bar{T}_i < T_{c-\max} \\ \text{°D}_i &= T_{c-\max} - T_{c-\min} \quad \text{si } \bar{T}_i > T_{c-\max} \\ \text{°D}_i &= 0 \quad \text{si } \bar{T}_i < T_{c-\min} \end{aligned} \tag{8}$$

Con los datos diarios de las temperaturas promedio de la estación meteorológica ( $T_{\text{promst}}$ ) de Soledad de Graciano Sánchez (24081) y los valores registrados por los sensores en el experimento ( $T_{\text{promsen}}$ ), se obtuvieron las temperaturas promedio mensual del mes de julio (Tabla 4), los valores puntuales se utilizaron como set up en el modelo computacional.



**Tabla 4.** Escenarios de simulación para la evaluación

Escenario	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)
$T_{promsen}$	18.89	3.85
$T_{promst}$	20.29	3.85

Se seleccionó la estación meteorológica 25171 de Navolato, Sinaloa que cuenta con información desde hace 38 años y la estación 154145 del municipio de Texcoco en el estado de México que cuenta con información desde hace 50 años, para analizar la eficiencia térmica del invernadero mediante la aplicación de grados días de crecimiento en dos municipios con características climáticas diferentes

## Resultados y Discusión

### Evaluación del modelo

Los resultados de la temperatura promedio registrada en los cinco sensores del invernadero (Figura 1) no muestran diferencias mayores a 3.3 °C entre el modelo computacional y el experimento (Tabla 5), sin embargo, se procedió a realizar un análisis de varianza de un solo factor para determinar si existe diferencia significativa entre los valores de temperatura registrados.

**Tabla 5.** Temperaturas distribuidas al interior del invernadero

Temperaturas modelo (°C)			
Sensor	Experimento	$T_{promsen}$	$T_{promst}$ (24081)
1	20.12	20.09	21.50
2	20.39	20.71	22.11
3	22.00	20.07	21.47
4	20.40	19.41	20.81
5	20.07	21.95	23.35

Los resultados de ANOVA (Tabla 6) muestran que el valor crítico para Fisher con un valor de significancia del 0.05 fue de 3.8852, mientras que el valor de F de la tabla ANOVA fue de 3.5927, aceptando la hipótesis nula demostrando que no existe diferencia significativa entre los valores de temperatura dentro del invernadero para el experimento,  $T_{promsen}$  y  $T_{promst}$  en Soledad de Graciano en San Luis Potosí.

**Tabla 6.** Análisis de varianza de un factor

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5.9203	2	2.9601	3.5927	0.0598	3.8852
Dentro de los grupos	9.8872	12	0.8239			
Total	15.8076	14				



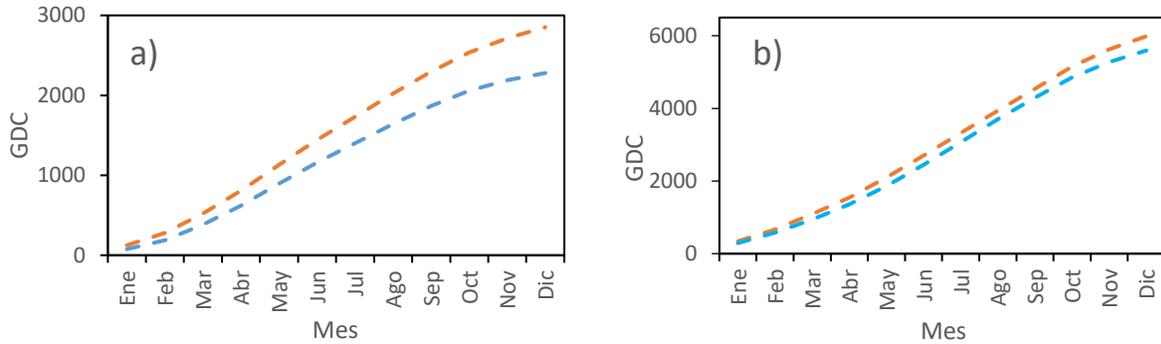
## Evaluación de grados días de crecimiento

Se calcularon los grados días de crecimiento para los dos modelos simulados y el experimento durante el mes de julio en Soledad de Graciano Sánchez. Los resultados muestran cierta discrepancia entre los grados días de crecimiento del experimento, y los calculados con  $T_{promst}$ , existiendo un error porcentual del 11.79% considerado aceptable y estableciendo la capacidad de CFD y el uso de temperaturas promedio mensuales de las estaciones meteorológicas como una herramienta para el cálculo de grados días de crecimiento. Con los valores diarios de temperatura promedio de las estaciones meteorológicas, se calcularon los valores  $T_{prom}$  mensuales del año para cada estación y se obtuvo la velocidad del viento promedio mensual (Tabla 7).

**Tabla 7.** Temperatura y velocidad del viento de los municipios seleccionados

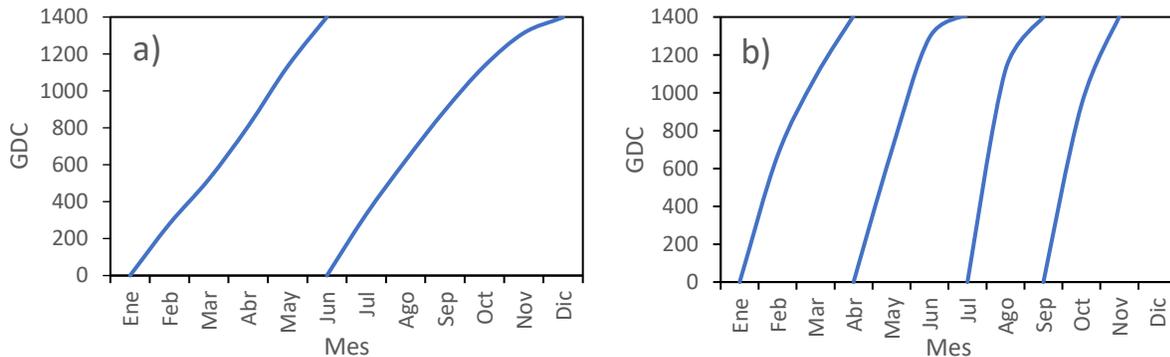
Mes	Navolato, Sinaloa		Texcoco, Estado de México	
	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)
Ene	19.41	3.07	12.45	3.58
Feb	20.18	3.07	13.98	3.89
Mar	21.83	3.12	16.25	4.02
Abr	23.77	3.13	18.02	3.69
May	26.30	3.18	18.86	2.84
Jun	29.58	3.29	18.71	2.54
Jul	30.19	2.72	17.81	2.66
Ago	30.26	2.49	17.80	2.5
Sep	29.79	2.56	17.48	2.56
Oct	28.27	2.74	16.15	2.7
Nov	24.07	2.96	14.39	2.97
Dic	20.14	3.06	12.91	3.25

Los valores de la temperatura y velocidad del viento fueron utilizados como set up, realizando un total de 24 simulaciones. Los resultados de las temperaturas promedios dentro del invernadero en las simulaciones se utilizaron para calcular los GDC. La figura 2 muestra que para el municipio de Texcoco (Figura 2a) existe un incremento anual en los GDC del 25.15% en cultivo bajo invernadero en comparación a cielo abierto, sin embargo, para el municipio de Navolato (Figura 2b) el incremento en los GDC fue de 7%, demostrando que, para zonas con temperaturas por debajo de los 20 °C, el uso de invernaderos incrementa de manera sustancial los GDC en comparación de regiones con temperaturas por encima de los 20 °C.



**Figura 2.** GDC cielo abierto (---) invernadero (---), a) Texcoco, b) Navolato

Para establecer los ciclos de cultivo durante el año hasta su cosecha, se determinó como fecha inicial del primer ciclo, el primer día del mes de enero. Los resultados de la figura 3 muestran que, en el municipio de Texcoco, se cumplen con los GDC para dos ciclos de cultivo de jitomate hasta su cosecha según lo establecido por Ardila et al., (2011), el primer ciclo abarca 177 días y el segundo ciclo 176 días (Figura 3a). En el municipio de Navolato es posible cumplir con cuatro ciclos de cultivo de jitomate hasta su cosecha durante el año, el primer ciclo abarca 111 días, el segundo ciclo abarca 76 días, el tercer ciclo abarca 70 días y el cuarto ciclo abarca 77 días (Figura 3b).



**Figura 3.** GDC a) Texcoco, b) Navolato.

## Conclusiones

El uso de herramientas como CFD y datos de estaciones meteorológicas pueden ser utilizadas para establecer una correlación de la eficiencia térmica del invernadero basado en los GDC usados para determinar la duración del ciclo del cultivo hasta la cosecha y el mejor periodo para cultivar de manera local, siendo necesario la complementación de este trabajo mediante la evaluación de manera experimental.

## Referencias Bibliográficas

Ardila G, Fischer G, Balaguera-López HE. Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tiempo fisiológico bajo invernadero. *Rev Colomb Cienc Hortic.* 2011; 5(1):44-56.



- Bouhoun Ali, H., Bournet, P. E., Cannavo, P. y 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 in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.021>.
- Boulard, T., Roy, J. C., Pouillard, J. B., Fatnassi, H. y Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158, 110–133. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001>.
- Camargo, Marcelo & Hubbard, Kenneth. (1999). Spatial and temporal variability of daily weather variables in sub-humid and semi-arid areas of the United States high plains. *Agricultural and Forest Meteorology*. 93. 141-148. 10.1016/S0168-1923(98)00122-1.
- Castilla N. (2004). *Invernaderos de Plastico: tecnologia y manejo*. Mundo prensa. Madrid, España.
- 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(1), 54–54. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.289354>.
- DALY, C. (2006). Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology*. Vol. 26, March, pp. 707-721.
- DE KONING, A. N. M. (1990). Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Scientia Horticulturae*, 45, 117–127.
- Doorenbos, J., and W. O. Pruitt. 1977. *Crop water requirements*. FAO paper 24. Roma, Italia. 144 p.
- HEUVELINK, E. 1989. Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 38, 11–22.
- Íñiguez-covarrubias, M., Ojeda-bustamante, W., & Sifuentes-ibarra, C. D. E. 2014. Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal \* Analysis of four variables associated with rainy seasonal in maize cultivation *Resumen Introducción*, 5, 101–114.
- Korner, O. and Challa, H. 2003. Process-based humidity control regime for greenhouse crops. *Computers and electronics in agri*. 39:173-192.
- Mesmoudi K, Meguallati K, Bournet PE. 2017. Effect of the greenhouse design on the thermal behavior and microclimate distribution in greenhouses installed under



semi-arid climate. Heat Transfer–Asian Res. 00:1–18.  
<https://doi.org/10.1002/htj.21274>.

Neild, R. E., and D. T. Smith. 1997. Maturity dates and freeze risks based on growing degree days. University of Nebraska. Paper G83-673-A. 5 p.

Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes, D. C. Slack, and M. Carrillo. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53: 251-261.

Rodríguez, W. y V. Flórez. 2006. Comportamiento fenológico de tres variedades de rosas rojas en función de la acumulación de la temperatura. *Agron. Colomb.* 24(2), 247-257.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2016. Recuperado de [http://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016](http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016).

Subin, M. C., Lourence, J. S., Karthikeyan, R., & Periasamy, C. (2018). Analysis of materials used for Greenhouse roof covering -structure using CFD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/346/1/012068>.

Yang S, Logan J, Coffey DL. 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agric For Meteorol.* 74(1-2):61-74. Doi: 10.1016/0168-1923(94)02185-M.

Zotarelli, L., J.M. Scholberg, M.D. Dukes, R. MuñozCarpena y J. Icerman. 2009. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agr. Water Manage.* 96, 23-34.