Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

Artículo

Temperatura y humedad relativa en invernadero semienterrado durante el otoño en Valles Altos de México

Alma Rosa Monroy-Venegas [1]
Miguel Ángel Valdez-García [2, §]
Vicente García-Flores [2]
Raúl Nieto-Angel [3]

1 Unidad Morelos-Universidad Mexiquense del Bicentenario. Camino Real SN, Barrio Primero, San Bartolo Morelos, Estado de México, México.

2 Visión y Desarrollo Agrosostenible S de RL de CV. Privada de la Palma 26, San Luis Huexotla, Texcoco de Mora, Estado de México, México. CP. 56220.

3 Universidad Autónoma Chapingo-Departamento de Fitotecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230.

Autor para correspondencia: migvaldezg@hotmail.com

Resumen

En Valles Altos, las temperaturas mínimas diarias <10 °C condicionan la producción de hortalizas de alto valor económico, aun en invernaderos sin calefacción; debido a que el salto térmico que produce la cubierta plástica esta entre 1 y 3 °C situación que vulnera a los productores pequeños y medianos; como parte de las estrategias para disminuir su dependencia de sistemas de calefacción activos, se construyó en el municipio de Morelos, Estado de México, un invernadero convencional y otro semienterrado (IS) a -1.7 m, ambos de 96 m^2; se midió la temperatura y humedad relativa cada 10 min en el un invernadero convencional, semienterrado y campo abierto del 18 de septiembre al 17 de diciembre de 2025. Lo resultados mostraron que un invernadero convencional con respecto a campo abierto y un invernadero convencional aumenta significativamente la temperatura mínima en 4.42 °C y 3.35 °C respectivamente, lo mismo ocurre con la temperatura media diaria en 6.2 °C (IS vs CA) y 2.6 °C (IS vs IC). La diferencia de humedad relativa registrada fue significativa entre las tres condiciones, siendo menor en campo abierto (66.14%), con respecto a IS (68.29%) e invernadero convencional (69.41%). Los grados día de desarrollo con corte vertical a 30 °C y temperatura base a 10 °C son iguales entre un invernadero convencional y semienterrado en días con precipitación >2 mm, mientras que con lluvia ≤2 mm, se registraron valores más altos en semienterrado. Las temperaturas mínimas generadas en semienterrado son insuficientes para hortalizas que requieren un mínimo de 10 °C sin depender de energías auxiliares.

Palabras clave:

agricultura protegida, calefacción pasiva, gestión del clima, inversión térmica.



License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

Introducción

La superficie con agricultura protegida (AP) en México hasta 2022 alcanzó 77 417 ha, resultado de una tasa media de crecimiento anual del 6%. El Estado de México es la entidad con la mayor área de invernaderos (3 489 ha) (SIAP 2015; INEGI, 2022), y el jitomate es la especie olerícola predominante en el 41.4% de los invernaderos mexiquenses (INEGI, 2022).

El 50.5% de las unidades de producción con AP en el Estado de México se ubican en la región de los Valles Altos, los cuales se caracterizan por ubicarse entre 2 200 a 2 600 msnm, cuentan con clima templado subhúmedo con lluvias en verano, presentan rangos de temperatura entre 6.5 a 22 °C en los meses más cálidos y -3 a 18 °C en los meses más fríos (INEGI 2023).

En Valles Altos, las temperaturas mínimas diarias (<10 °C) que ocurren a partir del inicio de otoño condicionan la producción de hortalizas de alto valor económico, aun en invernaderos convencionales sin calefacción; debido a que el salto térmico que produce la cubierta plástica es de tan sólo 1 a 3 °C por encima del campo abierto. En noches con cielo despejado, ausencia de viento y baja humedad ambiental, pueden ser más fríos que la intemperie (Castilla, 2013; Grisey *et al*., 2023).

Los métodos para calentar el entorno de las plantas incluyen la operación de sistemas pasivos o activos, mientras que los primeros tienden a disminuir la velocidad con que se pierde calor durante la noche, los sistemas activos adicionan calor al ambiente a una tasa mayor a la que el recinto lo pierde, manteniendo así la temperatura deseada (Ahamed *et al*., 2018). Si bien, los mejores resultados se obtienen operando ambos sistemas, lo anterior requiere de fuertes inversiones económicas que no son accesibles para la mayoría de los productores medianos y la totalidad de los pequeños.

Los invernaderos semienterrados (IS) constituyen una alternativa para la gestión pasiva del clima (Brunetti, 2025b). El estado del arte de los IS mantiene centrada la investigación en el análisis del fenómeno y su optimización funcional durante la estación fría; sin embargo, Brunetti (2025a) recomienda el estudio de la tecnología durante todo el año.

La pertinencia social del presente estudio se fundamenta en el hecho que, los productores minifundistas de México tienen escasez de tecnología, infraestructura y economía de escala que los hace vulnerables; sus pérdidas, aunque de montos pequeños crea daños vitales a su patrimonio (Reséndez *et al*., 2011).

La investigación tuvo como objetivo comparar la temperatura, humedad relativa y déficit de presión de vapor en tres ambientes (campo abierto, invernadero convencional e invernadero semienterrado) en el municipio de Morelos, Estado de México, mediante el empleo de sensores para ampliar la ventana de producción de los cultivos de alto valor dentro de invernaderos sin calefacción en otoño.

Materiales y métodos

Ubicación y clima del sitio

El estudio se realizó en un predio ubicado en el municipio de Morelos, Estado de México, en las coordenadas 19° 45´13.17'' latitud norte y 99° 41' 31.34'' longitud oeste, con una altitud de 2 600 m. La temperatura normal mínima y máxima mensual del trimestre más cálido está entre 6.3 y 23.1 °C, en tanto que su periodo homólogo de los meses más fríos se sitúa entre 0.5 y 18.6 °C (CNA, 2025).

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

El clima del sitio es templado subhúmedo con lluvias en verano; durante el otoño la precipitación y temperatura disminuyen (con mañanas y noches frías), la humedad relativa baja y se incrementa el número de días despejados.

Forma de la estructura y características dimensionales

El estudio se llevó a cabo en dos invernaderos de 96 metros cuadrados (8 m de ancho x 12 m de largo) y 3.4 m de altura a la base del arco, con orientación norte-sur, tipo unitúnel con ventila cenital, ventana orientada hacia el oriente y con amplitud de 0.65 m, las dimensiones son representativas de las unidades de producción más pequeñas de la región.

Uno de los invernaderos se encuentra sobre la superficie del suelo, a este se le denominó invernadero convencional (IC). El segundo, de nombre invernadero semienterrado (IS) se encuentra colocado a 1.7 m de profundidad, en la periferia de este se construyó un muro perimetral con block macizo de construcción de 12 cm de espesor hasta alcanzar el nivel del suelo, de allí se encuentra colocada la columna a una altura al canal de desagüe de 1.7 m, lo anterior permite una distancia del subsuelo a la base del arco de 3.4 m.

La relación volumen/área de ambos modelos fue de 4.48 m^3 m^{-2}, lo anterior para eliminar el ruido que podría ocasionar en la inercia térmica debido a la diferencia de proporciones.

Tipo y disposición de cubiertas

En la pared norte del IS se colocó doble película de polietileno de baja densidad color blanco calibre 720 (0.18 mm) con 25% de transmisión de luz global visible (TLGV), entre ambas películas se colocaron cuatro lienzos de espuma de polietileno expandido que lograron un espesor de 2.54 cm, también de color blanco. En la pared sur y el techo se instalaron dos películas plásticas calibre 720 con 85% de TLGV cada una, con un valor acumulado de 72.2% al estar en contacto directo.

Las cortinas de ventilación fueron de una sola capa de plástico del mismo color y grosor que en los techos. La cara interna de las paredes de block estuvo recubierta con una capa de espuma de polietileno expandido de 0.63 mm. El piso estuvo recubierto con una capa de arena gris para construcción con espesor de 5 cm.

En todas las paredes y el techo del invernadero convencional se colocó solo una capa de película de polietileno blanco calibre 720 con 70% de TLGV, debido a que es el color y transparencia que más se usa en invernaderos de la región. Si bien, lo recomendable era incluir películas plásticas que tuvieran la misma TLGV que en el modelo semienterrado, a nivel comercial en México no existen plásticos calibre 720 con TLGV del 72.2%.

En ambos invernaderos, se evitó la existencia de malezas y cultivo para evitar sesgos en la humedad relativa derivada de la evapotranspiración de las plantas. En ambos invernaderos la ventana cenital y las laterales estuvieron recubiertas en su cara externa con una capa de malla antiáfido color blanco cristal de 16 x 10 hilos por centímetro cuadrado (hpc), que genera una sombra del 26.4%. Las ventilas fueron accionadas de manera manual con malacates y guía de torsión.

La relación de área ventilada fue del 75.7 y 40.7% para el tipo convencional y semienterrado, respectivamente. En cuanto a la superficie expuesta, esta fue de 271.4 m^2 para el tipo convencional y 203.4 m^2 para el invernadero semienterrado.

Manejo de la ventilación

Debido a que las ventilas laterales y cenitales del invernadero fueron de accionamiento manual, éstas se abrieron entre las 10:50-11:00 h y fueron cerradas entre 15:40-15:50 h, la naturaleza del mecanismo de apertura sólo permitió mantenerlas totalmente abiertas o cerradas.



DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

Colectores de datos

Se emplearon tres registradores de datos (uno para cada ambiente: CA, IC e IS), modelo RHT10 (Teledyne FLIR, 2025) los cuales fueron colocados dentro de un escudo contra radiación solar con ventilación natural, marca Seeed Studio modelo 114992222 y se fijaron al mástil de un tripie que los mantuvo a 1.55 m sobre el nivel del piso, la base estuvo justo en el centro de cada invernadero. El software para la descarga de los datos fue, el proporcionado por el fabricante de los registradores (Extech Instruments, 2019).

Información de precipitación

Debido a que la primera mitad del otoño aún se presentan precipitaciones y éstas pueden alterar la conductividad térmica del suelo, se consideró relevante incluir en los distintos análisis información de la precipitación diaria (mm día^{-1}) generada por el NASA data access viewer (NASA, 2025).

Metodología en la recolección y procesamiento de datos

En el periodo en que se recolectaron los datos (18 de septiembre al 17 de diciembre de 2025), la frecuencia de captura de temperatura ambiente (°C) y humedad relativa (%) se programó a cada 10 min, con esta información fueron calculadas para campo abierto (CA), el invernadero convencional (IC) y el invernadero semienterrado (IS) las siguientes variables respuesta: diferencia de la temperatura mínima (°C) entre CA, IC e IS.

Los grados día de desarrollo (GDD), son las unidades de la cantidad total de calor necesaria, entre los umbrales inferior y superior, para que un organismo se desarrolle de un punto a otro de su ciclo vital), se eligió el método de integral numérica con y sin corte vertical, considerando como temperatura base (T_{min}) 10 °C y temperatura máxima (T_{max}) 30 °C (Shamshiri *et al*., 2018).

Este cálculo elimina sesgos innecesarios que se generan en otros modelos como promedio simple, triangular, seno e inclusive doble seno. El corte vertical representa de mejor manera al comportamiento fisiológico del cultivo cuando se expone a temperaturas mayores a la máxima biológica (estrés térmico, cierre estomático, detenimiento de la fotosíntesis, deficiencias en polinización y cuajado de frutos, entre otros) (Visakh *et al*., 2026).

Tiempo diario (horas) en el que el déficit de presión de vapor (DPV) se encuentra en el rango de >0.8-1.5 kPa durante el día, valores considerados como mínimo y máximos en el cultivo de jitomate bajo invernadero (Shamshiri *et al*., 2018). La fórmula empleada para el cálculo del DPV fue tomada de la norma ASAE EP505.1 APR2015 (R2024) (ASABE, 2024) tomando en cuenta la fórmula de Allen *et al*. (1998) para el cómputo de la presión de vapor de saturación.

Los registros provienen de lecturas de temperatura ambiente (°C) y humedad relativa (%) tomadas cada 10 min (144 lecturas día^{-1}) durante 91 días, del 18 de septiembre al 17 de diciembre de 2025, en los tres ambientes del experimento. Se obtuvieron 13 070 lecturas válidas. El análisis estadístico se realizó con el paquete RStudio versión 2024.12.1., R Core Team (2024).

Resultados y discusión

Durante el periodo de análisis, la temperatura mínima diaria dentro del IC fue en promedio 1.07 ±0.59 °C superior con respecto al CA, lo cual coincide con lo reportado por Castilla (2013), quien atribuye el escaso gradiente a la permeabilidad del polietileno a radiación infrarroja, situación que se agrava cuando se combina con invernaderos de dimensiones reducidas, los cuales cuentan con mayor área expuesta que acelera la perdida de calor por radiación y conducción.

Pese a la diferencia en las temperaturas mínimas del IC y CA se corroboró mediante prueba de comparación de medias (Kruskal-Wallis) que no existe diferencia significativa entre éstas (p= 0.052).

La ganancia térmica del IS sobre el CA fue de 4.42 ±1.81 °C; la prueba de comparación de medias (Kruskal-Wallis) evidenció diferencias estadísticas significativas (p= 0.001). Estos resultados

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

fueron superiores a los obtenidos por Arana (2013) el cual registró ganancias promedio de 2.5 °C al comparar la temperatura mínima del CA con un IS a en el Marqués, Querétaro y también a los 3.11°C obtenidos por Aguilar (2018) en un invernadero asimétrico tipo chino en Chapingo, Estado de México.

Este incremento térmico de 1.92 °C es atribuible a la diferencia de grosor de las cubiertas plásticas, el número de capas que se emplearon en el presente experimento y el aislamiento de la pared norte con espuma de polietileno, debido a que Arana (2013) empleó sólo una película plástica calibre 600 con una pantalla térmica aluminizada horizontal que fue distendida por la noche y retraída en el día.

En cuanto a temperaturas ambiente (°C), los resultados estadísticos indicaron la existencia de diferencias significativas entre CA, IC e IS (p= 0.001), incluidas sus comparaciones pareadas. Lo anterior coincide con lo encontrado por Goodarzi *et al*. (2023) cuando compararon IC e IS a -1.5 m (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de medias y pruebas post-hoc de la variable 'temperatura ambiente.

Comparación	Diferencia de medias	Error estándar	IC 95%	p
CA vs IC	-3.603	0.0695	(-3.834-3.373)	<0.052
CA vs IS	-6.107	0.0695	(-6.338-5.877)	<0.001
IC vs IS	-2.504	0.0695	(-2.734-2.274)	<0.001

Se presentó inversión térmica en la noche del 28-29 de octubre y 9-10 de noviembre de 2025, fechas en que la diferencia de temperatura mínima entre IC y CA fue de -1.5 °C y -0.1 °C, respectivamente; Espinal *et al*. (2015); Hernández *et al*. (2022) afirman que el fenómeno se presenta cuando se combinan cielo despejado, noches frías y poco viento. Entre IS y CA, no se presentó inversión de temperatura, aunque durante las noches del 9 y 10 de octubre la ganancia fue de solo 0.2 °C.

Los grados días de desarrollo (GDD) fueron distintos entre CA (314.2), IC (448.8) e IS (527.2). La capacidad del IS para acumular en este periodo 67.8% y 17.5% más energía térmica útil que CA e IC es indicativo que la temperatura del invernadero semienterrado ayudará a mantener el crecimiento de los cultivos en esa misma proporción (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación de medias y pruebas post-hoc de la variable 'grados días de desarrollo (GDD'.

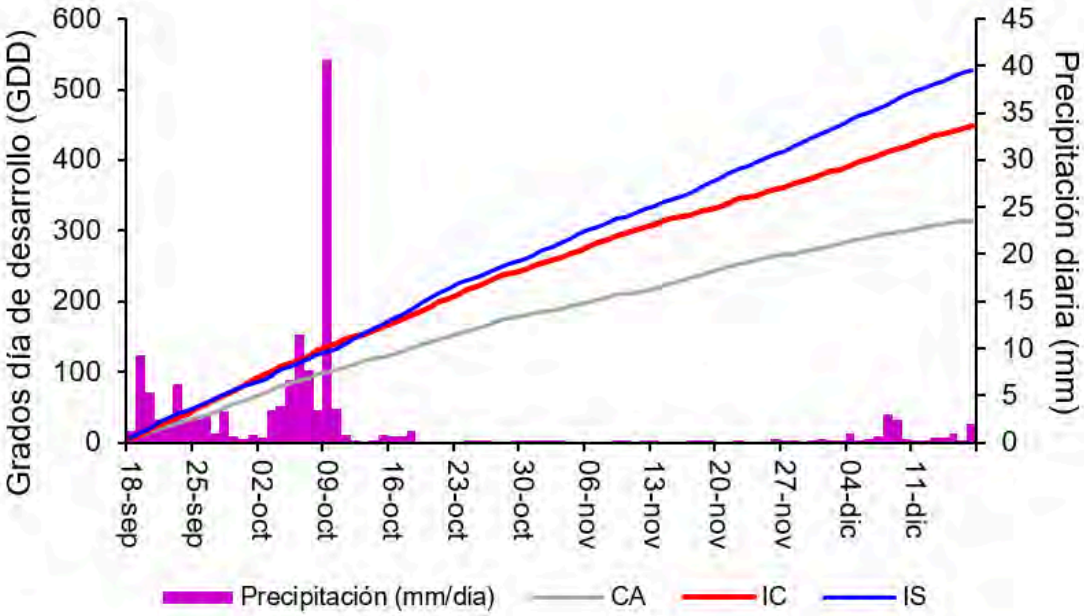
Comparación	Diferencia de medias	Error estándar	IC 95%	p
CA vs IC	-0.264	0.00776	(-0.29-0.238)	<0.001
CA vs IS	-0.376	0.00776	(-0.402-0.35)	<0.001
IC vs IS	-0.112	0.00776	(-0.138-0.086)	<0.001

Pese a la mayor eficiencia del IS, el seguimiento diario de los GDD permitió identificar dos situaciones (en días con precipitación >2 mm la acumulación de GDD es la misma entre IC e IS (p= 0.857), mientras que con lluvia escasa (≤ 2 mm) o nula, existe ventaja significativa del IS (p= 7.36 x 10^{-6}) (Figura 1).



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas
DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

Figura 1. Grados días de desarrollo (GDD) acumulados en los tres ambientes (CA, IC e IS) y la precipitación diaria (mm).



La explicación a lo anterior podría encontrarse en que precipitaciones mayores a 2 mm saturan de agua la capa superior del suelo y el área excavada. Según (Markert y Wessolek, 2016), la elevada conductividad térmica derivada del suelo húmedo y otros factores acelera la pérdida del calor acumulado en las paredes hacia el exterior frío y activa un proceso de enfriamiento evaporativo.

La humedad del suelo presenta una alta variabilidad diaria fuertemente correlacionada con la evaporación (Cheruy *et al*., 2017); sin embargo, en latitudes altas o medias, la humedad del suelo, mediante su control sobre la inercia térmica, reduce el impacto del enfriamiento evaporativo diurno al disminuir el enfriamiento nocturno.

Esto resulta en una disminución drástica de su capacidad de amortiguación térmica, disipando la energía hacia la atmósfera hasta igualar los valores de temperatura de campo abierto (Zhang *et al*., 2021), el fenómeno dura tanto como permanecen las condiciones de saturación de humedad, evidencia de lo anterior fue la acumulación de GDD ocurrida el 9 de octubre, fecha en que se registró precipitación de 40.7 mm, si bien el IC tuvo una acumulación 14.3% más GDD que el IS, el siguiente día (10 de octubre) esta diferencia fue aún mayor (20.4%) a pesar de presentarse una precipitación de sólo 3.5 mm y que, este segundo día tuvo una temperatura media diaria a campo abierto superior en 0.77 °C.

La humedad relativa (%), mostró diferencias estadísticas en cada uno de los tres ambientes (Kruskal-Wallis, $p= 6.68 \times 10^{-20}$), incluidas sus comparaciones pareadas, siendo los promedios CA (66.1 %) <IS (68.3 %) <IC (69.4 %) (Cuadro 3). En el CA el viento desplaza la masa de aire y genera los menores valores de humedad relativa, mientras que en los ambientes protegidos (IC e IS), las cubiertas plásticas forman una barrera que disminuye la velocidad interna del viento, aumentando así la cantidad de la humedad (Qianjun y Hongwei, 2024).

Entre IC e IS la diferencia de humedad se debió a que el suelo excavado del IS actúa como un disipador y aislante térmico natural. Esto mantiene una temperatura interior más alta en la noche y más fresca al mediodía que en el IC. Esta inercia térmica reduce los picos extremos de humedad relativa; especialmente por la noche, el mayor calor nocturno eleva la capacidad de saturación del aire, evitando la condensación y resultando en un promedio general ligeramente menor que el del IC.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

En la variable déficit de presión de vapor (DPV), se observó también diferencia estadística significativa entre CA, IC e IS (Kruskal-Wallis, p= 1.0 x 10^{-6}) al igual en sus comparaciones pareadas (Wilcoxon), siendo sus promedios IS (0.58 kPa) >IC (0.84 kPa) >CA (0.95 kPa) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estadística descriptiva de los tres ambientes campo abierto (CA), invernadero convencional (IC) e invernadero semienterrado (IS) y de las tres variables de estudio.

Variable	Ambiente	n	Media	Varianza	Mín	Máx
Temperatura ambiente	CA	13070	11.693	35.105	-3.5	23.2
	IC	13070	15.297	86.856	-2.1	42.7
	IS	13070	17.801	67.504	3.9	43.6
Humedad relativa	CA	13070	66.136	353.355	7.9	89.1
	IC	13070	69.412	462.491	10.1	95.5
	IS	13070	68.293	428.904	14.9	93.2
Déficit de presión de vapor	CA	13070	0.5774	0.2588	0.072	2.509
	IC	13070	0.8414	0.9645	0.065	6.502
	IS	13070	0.9532	1.1408	0.065	5.899

El análisis del tiempo (h) en que el DPV permaneció dentro del rango óptimo del cultivo de jitomate (>0.8-1.5 kPa) reveló también la presencia de diferencias estadísticamente significativas (Kruskal-Wallis, p= 9.6 x 10^{-6}), la comparación de pares (Wilcoxon) muestra que el CA vs el IC e IS tienen diferencias significativas (p= 1.9 x 10^{-12}), sin embargo, entre IC e IS no son diferentes (p= 0.77).

Finalmente, al evaluar el efecto de la precipitación en el DPV tanto en días lluviosos (>2 mm) como en los secos (≤2 mm), la prueba de t de Student confirmó la ausencia de diferencias significativas entre CA, IC e IS (p= 0.761).

Conclusiones

Los cambios que genera el invernadero semienterrado (IS) con respecto al campo abierto (CA) e invernadero convencional (IC) son: aumento significativo de la temperatura mínima de 4.42 ° C y 3.35 °C respectivamente, al igual que la temperatura media diaria en 6.2 °C y 2.6 °C en el orden dado.

La diferencia de humedad relativa registrada fue significativa entre las tres condiciones, siendo menor en CA (66.14%), con respecto a IS (68.29%) e IC (69.41%).

Durante el día, los grados días de desarrollo (GDD) en el IS se acumulan un 67.8% >CA y 17.5% >IC. En días con precipitación >2 mm los GDD que se acumulan en el IC e IS no tiene diferencia estadística, mientras que días con lluvia escasa (≤2 mm) o nula, se observa una superioridad estadística del IS con respecto al IC (22.9%).

Las temperaturas mínimas generadas en el invernadero semienterrado aun no son suficientes para lograr la producción de cultivos hortícolas que requieren una mínima biológica de 10°C sin la dependencia de energías auxiliares (solar, eléctrica, combustibles fósiles, entre otras).

Se recomienda continuar con la medición de variables conservando las mismas características tecnológicas del experimento por al menos un año, para identificar el comportamiento de las variables en el resto de las estaciones climáticas. Adicionalmente se sugiere incorporar la medición de humedad específica para eliminar el ruido que ocasiona la temperatura ambiente en la interpretación de la humedad.

Agradecimientos

Al consejo mexiquense de ciencia y tecnología AC, por la financiación de la infraestructura en el marco del programa de Investigadoras e Investigadores COMECYT 2025.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

Bibliografía

1 Aguilar, M. A. J. 2018. Análisis CFD del ambiente nocturno de un invernadero asimétrico tipo chino. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 53-54 pp.

2 Ahamed, S.; Guo, H. and Tanino, K. 2018. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. Biosystems Engineering. 179:9-33. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.

3 Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO irrigation and drainage paper No. 56. Rome. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm.

4 ASABE. 2024. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Asae Ep505.1 APR2015 [R2024]. Measurement and reporting practices of automatic agricultural weather stations. Norma Technical. https://webstore.ansi.org/standards/asabe/asaeep505apr2015r2024?srsltid=afmboooxhkcp9qz9a0qx6hl9vj9giwrfzsrxfve7qhuaxpdgpqqhgwyb.

5 Arana, J. A. 2013. Implementación de pantallas térmicas e invernadero semi-enterrados como opción para el control pasivo de las variables climáticas. Tesis de maestría en ingeniería de biosistemas. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 35-40 pp.

6 Brunneti, G. L. 2025a. Preliminary indicators for passive solar greenhouse design. Solar Energy. 290:113385. 10.1016/j.solener.2025.113385.

7 Brunneti, G. L. 2025b. The passive solar greenhouse blind spot: a historical review of book literature and the cultural gap in Western design discourse. Solar Energy, 348:116397. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116397.

8 Castilla, N. 2013. The greenhouse climate. In: greenhouse technology and management. CABI. https://rexresearch1.com/greenhouselibrary/greenhousetechnologymanagement.pdf.

9 Cheruy, F.; Dufresne, J. L.; Aït-Mesbah, S.; Grandpeix, J. Y. y Wang, F. 2017. Papel de la inercia térmica del suelo en la temperatura superficial y la retroalimentación humedad-temperatura del suelo. Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 9(8):2906-2919. https://doi.org/10.1002/2017MS001036.

10 CNA. 2025. Comisión Nacional del Agua. Normales Climatológicas (1991-2020) de la estación 15071, Presa El Tigre. Comisión Nacional del Agua. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Base de datos climatología nacional. Disponible en: https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica.

11 Extech Instruments 2019. Datalogger (versión 5.8.3). Software informático.

12 Goodarzi, M.; Hydayatipour, A. and Ghadbeiklou, J. 2023. The feasibility of underground greenhouses construction as an action to reduce climate change impacts. Journal of Drought and Climate Change Research. University of Birjand-Research Group of Drought and Climate Change. 1(2):53-62. https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6016.1011.

13 Grisey, A.; Justine, G.; Vincent, S. and Masson, A. 2023. Increasing night temperature in a tunnel without heating system. Acta Horticulturae. 137:149-156. Doi: 10.17660/ActaHortic.2023.1377.18.

14 Hernández-Rodríguez, J.; Reyes-Requena, R.; Granados-García, M. R. y Lorenzo-Mínguez, P. 2022. Pantallas térmicas. En: Bonachela-Castaño, S.; Hernández-Rodríguez, J.; López-Hernández, J. C.; Lorenzo-Mínguez, P. y Magán-Cañadas J. J. (Eds.). Sistemas pasivos de calefacción en invernaderos mediterráneos. 83-93 pp. Universidad de Almería. Libro digital: sistemas pasivos de calefacción en invernaderos mediterráneos. Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

15 INEGI. 2022. Censo agropecuario. Tabulados Básicos. Número de unidades de producción y superficie con agricultura protegida según tipo de estructura o construcción por entidad federativa y cultivo. https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/#tabulados.

16 INEGI. 2023. Aspectos geográficos de México. Compendio 2023. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod-serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva-estruc/889463916017.pdf.

17 Kim, H. K.; Lee, S. Y.; Kwon, J. K. and Kim, Y. H. 2022. Evaluating the effect of cover materials on greenhouse microclimates and thermal performance. Agronomy. 12(1):143. https://doi.org/10.3390/agronomy12010143.

18 Markert, A.; Peters, A. and Wessolek, G. 2016. Analysis of the evaporation method to obtain soil thermal conductivity data in the full moisture range. Soil Science Society of America Journal. 80(2):275-283. https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0316.

19 NASA. 2025. National Aeronautics and Space Administration. Nasa power data access viewer (DAV). Datos de precipitación acumulada diaria entre el 18 de septiembre y 17 de diciembre de 2025. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer.

20 Qianjun, M. and Hongwei, Li. 2024. Simulation of ambient temperature and humidity distribution in eight-span greenhouses under different wind conditions and corn height. Case Studies in Thermal Engineering. 61:105099. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105099.

21 R Core Team. 2024. R: a language and environment for statistical computing (versión 2024.12.1). Software. R Foundation for Statistical Computing. www.r-project.org.

22 Reséndez, A. M.; Aguilar, D. J. y Luévano, G. A. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. Revista Mexicana de Agronegocios. 29:763-774. https://doi.org/10.22004/ag.econ.114479.

23 SIAP. 2015. Servicio de información alimentario y pesquero. Superficie cubierta y número de instalaciones de agricultura protegida 2015. Datos abiertos. Estadísticas de producción agropecuaria. https://nube.agricultura.gob.mx/agriculturaProtegida/.

24 Shamshiri, R. R.; Jones, J. W.; Thorp, K. R.; Ahmad, D.; Che, M. H. and Taheri, S. 2018. Review of optimum temperature, humidity and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. International Agrophysics. 32(2):287-302. Doi:10.1515/intag-2017-0005.

25 Velasco, G. Á. M.; García-Zavala, J. J.; Sahagún-Castellanos, J.; Lobato-Ortiz, R.; Sánchez-Abarca, C. y Marín-Montes, I. M. 2020. Análisis de la variabilidad morfológica de maíces nativos y exóticos en Valles Altos de México. Revista Fitotecnia Mexicana. 43(4a):517-524. https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/829.

26 Visakh, R. L.; Anand, S.; Reddy, N. R. S.; Jha, U. C.; Sah, R. P. and Beena, R. 2026. Scientific insights into genetic and physiological response of heat stress in tomatoes. Planta. 263(1):24. https://doi.org/10.1007/s00425-025-04893-w.

27 Zhang, W.; Bai, R.; Xu, X.; Liu W. 2021. An evaluation of soil thermal conductivity models based on the porosity and degree of saturation and a proposal of a new improved model. International Communications in Heat and Mass Transfer. 129:105738. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105738.



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4181

Temperatura y humedad relativa en invernadero semienterrado durante el otoño en Valles Altos de México

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 June 2026
Date accepted: 01 September 2026
Publication date: 07 November 2026
Publication date: 2026
Volume: 17
Issue: 7
Electronic Location Identifier: e4181
DOI: 10.29312/remexca.v17i7.4181

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

agricultura protegida
calefacción pasiva
gestión del clima
inversión térmica

Counts

Figures: 2
Tables: 6
Equations: 0
References: 27