



RENDIMIENTO DE CHILE DE AGUA BAJO DIFERENTES CUBIERTAS DE MACROTÚNEL

YIELD OF CHILE DE AGUA UNDER DIFFERENT MACRO-TUNNEL COVERS

Cirenio Escamirosa-Tinoco¹, Gabino A. Martínez-Gutiérrez^{1*}, Isidro Morales¹, Teodulfo Aquino-Bolaños¹, Carlos I. Cortés-Martínez² y Oscar R. Cruz-Andrés¹

¹Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. ²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etla, Barrio del Agua Buena, Santiago Suchilquitongo, Oaxaca, México..

*Autor de correspondencia (gamartinezg@ipn.mx)

RESUMEN

El chile de agua (*Capsicum annuum* L.) es un tipo de chile endémico de Valles Centrales de Oaxaca, México con alta demanda por sus propiedades nutraceuticas y excelente sabor; sin embargo, la superficie sembrada ha disminuido, debido a la falta de incorporación de nuevas tecnologías para su cultivo. El objetivo fue evaluar el rendimiento de fruto de chile de agua, variedad local Abasolo, bajo materiales de cubierta de macrotúneles en dos ciclos de cultivo contrastantes. Los tratamientos fueron macrotúneles con cubierta de plástico verde (PV), transparente (PT), malla blanca (MB) y el testigo en campo abierto, conducidos en un diseño experimental completamente al azar con seis repeticiones, en los ciclos otoño-invierno 2016 (O-I) y primavera-verano 2017 (P-V). Las cubiertas de los macrotúneles, en comparación con el testigo, disminuyeron la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la humedad relativa (HR) y el déficit de presión de vapor (DPV), aumentando la temperatura (T); no obstante, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre cubiertas de plástico transparente y verde para RFA, T, DPV y HR, y fueron bajo estas cubiertas donde se obtuvieron las mejores condiciones ambientales, las cuales aumentaron el rendimiento en los dos ciclos de cultivo. El mayor rendimiento de fruto (6.08 kg m⁻²) se obtuvo bajo la cubierta de PT, que fue 328 y 608 % superior al obtenido en campo en el ciclo P-V y O-I, respectivamente. El chile de agua puede ser cultivado en ambos ciclos en macrotúneles con cubiertas de plástico transparente, verde y malla blanca.

Palabras clave: *Capsicum annuum* L., déficit de presión de vapor, humedad relativa, macrotúnel, radiación fotosintéticamente activa, temperatura.

SUMMARY

Chile de agua (*Capsicum annuum* L.) is a type of chili endemic to the Central Valleys of Oaxaca, Mexico with high demand for its nutraceutical properties and excellent flavor; however, the area planted to this crop has diminished, due to the lack of new technologies for its cultivation. The objective of this study was to evaluate the yield of the Abasolo landrace of chile de agua under a macro-tunnel with cover of green plastic (GP), transparent plastic (TP), white mesh (WM) and the control in open field, conducted in a completely randomized experimental design with six replications in the Autumn-Winter 2016 (A-W) and Spring-Summer 2017 (S-S) cycles. Macro-tunnel covers decreased photosynthetically active radiation (PAR), relative humidity (RH), vapor pressure deficit (VPD) and temperature (T) compared to the control;

however, no significant statistical differences were found between transparent and green plastic covers for PAR, T, VPD and RH. GP and PT provided the best environmental conditions, which increased yield in the two crop cycles. The highest fruit yield (6.08 kg m⁻²) was obtained under the PT cover, which was 328 and 608 % higher than that obtained in the field in the S-S and A-W cycles, respectively. Chile de agua can be grown in both cycles in macro-tunnels with transparent and green plastic cover, as well as with white mesh.

Index words: *Capsicum annuum* L., macrotunnel, photosynthetically active radiation, relative humidity, temperature, vapor pressure deficit.

INTRODUCCIÓN

El chile de agua (*Capsicum annuum* L.) es una hortaliza de fruto de crecimiento determinado y porte bajo, que tradicionalmente se cultiva en campo abierto en la región de los Valles Centrales de Oaxaca, México, de donde es nativa (Castellón-Martínez *et al.*, 2012). En los últimos 10 años, el consumo nacional de este fruto se ha incrementado (Carrillo *et al.*, 2009), al igual que el internacional (Aparicio-del-Moral *et al.*, 2013), siendo la población latina radicada en Estados Unidos de América la principal consumidora (Vargas-Ponce *et al.*, 2015). En Oaxaca, la superficie sembrada de chile de agua ha disminuido. En el año 2017, el SIAP (2017) reportó su siembra en solo 36 municipios de la región de los Valles Centrales, de los 57 que tradicionalmente se dedicaban a este cultivo. Lo anterior se debe, entre otros factores, a la falta de apoyo por instituciones públicas para fomentar su cultivo, ausencia de asistencia técnica, incremento de los costos de producción por la mano de obra requerida, así como el elevado uso de productos fitosanitarios para el control de plagas y enfermedades (López y Castro, 1989). La incorporación de innovaciones tecnológicas económicas y accesibles a este proceso productivo, como las estructuras de protección de bajo costo tipo macrotúneles, pueden ser una alternativa para recuperar

el cultivo de este tipo de chile, aumentar su rendimiento y mejorar la calidad de los frutos (Carrillo *et al.*, 2009; Martínez-Sánchez *et al.*, 2010).

Los macrotúneles son estructuras de protección que no tienen las características de anchura y altura al canal para ser considerados como invernaderos, pero que permiten que las personas trabajen en su interior, de acuerdo con la norma mexicana NMX-E-255-CNCP-2008 (Secretaría de Economía, 2008). En el mundo se encuentran macrotúneles con diversas formas geométricas, pero al igual que en México, predomina la de semiarco, debido a que son de fácil construcción, bajo costo, de 4 a 5 m de ancho y de 2 a 3 m de alto y de longitudes variables (Juárez *et al.*, 2011). El uso de este tipo de estructuras se recomienda para climas con muy pocas posibilidades de lluvias torrenciales, granizo y vientos huracanados, generalmente sin abertura de ventilación cenital, tienen bajo consumo de calor, eficiente ventilación natural y resistencia estructural no tan sólida como la de los invernaderos convencionales (Castilla, 2007).

En el interior de estos macrotúneles, las condiciones ambientales se presentan favorables para el desarrollo y producción de diversas hortalizas, principalmente de aquellas que son de crecimiento determinado como pimiento (*Capsicum spp.*), lechuga (*Lactuca sativa*), rábano (*Raphanus sativus*), cebolla (*Allium cepa*), zanahoria (*Daucus carota*), entre otras (Castilla, 2007).

El rendimiento de los cultivos y calidad de los frutos están influenciados, entre otros elementos, por factores climáticos como la intensidad de luz, temperatura, déficit de presión de vapor de agua en el aire y riqueza de CO₂ en la atmósfera, los cuales deben ser óptimos durante todo el periodo de cultivo (Tanny, 2012). El comportamiento de los parámetros microclimáticos como la temperatura (T), humedad relativa (HR) y déficit de presión de vapor (DPV), entre otros, es similar en el interior de los invernaderos y en los macrotúneles (Porres *et al.*, 2014).

El principal parámetro para controlar la captación de agua por la planta dentro de las estructuras de protección y que a su vez afecta a la polinización y el crecimiento, es el diferencial de presión de vapor (Shamshiri *et al.*, 2018). La selección de adecuadas cubiertas plásticas para los macrotúneles puede limitar el DPV sobre el cultivo, lo que podría aumentar su rendimiento. En cuanto a la radiación fotosintéticamente activa (RFA), el uso de malla sombra puede restringir la cantidad requerida por las plantas (García *et al.*, 2011). Durante los días soleados, la cubierta de película plástica difusiva sobre los invernaderos otorga de tres a cuatro veces más radiación que afuera (Baille *et al.*, 2003), causando menos proyección de la sombra;

además, dependiendo de la composición del plástico difusivo, la proporción de RFA dentro de las estructuras de protección puede ser igual o mayor, comparada con una película plástica transparente (López-Marín *et al.*, 2012).

En estructuras de protección con cubiertas plásticas, la parte visible de la radiación global es también uno de los factores esenciales para el crecimiento de las plantas y la intensidad de la radiación solar que penetra en su interior es otro parámetro que influye en el clima, tanto como la actividad fotosintética de las plantas (López-Marín *et al.*, 2012). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el rendimiento de fruto de chile de agua de la variedad local Abasolo, producido en dos ciclos de cultivo contrastantes, bajo macrotúneles con diferentes materiales de cubierta y en campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en el Campo Experimental del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca, del Instituto Politécnico Nacional, ubicado en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México (17° 1' 31" LN, 96° 43' 11" LO y 1530 msnm), durante dos ciclos agrícolas contrastantes: otoño-invierno (O-I) de 2016 y primavera-verano (P-V) de 2017. Las dimensiones de los macrotúneles fueron 15 × 3.5 × 1.95 m de largo, ancho y alto, respectivamente, con orientación este-oeste. El suelo agrícola en este sitio es de una textura arenosa con 91 % de arena, 2.7 % de limo y 6.3 % de arcilla; densidad aparente de 1.55 g cm⁻³; capacidad de campo de 8.5 % y punto de marchitez de 3.5 %; infiltración básica de 6.3 cm h⁻¹; materia orgánica de 1.6 %; CE del extracto de saturación de 1.2 dS m⁻¹ y 92, 142, 4318, 350 y 253 mg kg⁻¹ de P, K, Ca, Mg y SO₄ extractables, respectivamente, más 4 mg kg⁻¹ de N-NO₃. El agua de riego tuvo un pH de 7.82 y una CE de 7.82 dS m⁻¹. En cuanto al contenido de macroelementos, se tuvieron valores de 4.51, 1.56, 0.05, 1.18, 1.60 meq L⁻¹ de Ca, Mg, K, SO₄ y NO₃, en el mismo orden; en el caso de los microelementos se encontraron valores de 0.31, 0.11, 0.034, 0.002 y 0.02 mg L⁻¹ de B, Fe, Mn, Cu y Zn, respectivamente. Ambos análisis se realizaron bajo la norma mexicana NOM-021_REC/NAT-200 (SEMARNAT, 2001). Los resultados de estos análisis se utilizaron para hacer el ajuste de nutrientes de la solución nutritiva, de acuerdo con Segura y Cadahía (2000) para pimiento, mediante riego por goteo.

Tratamientos, diseño y parcela experimental

Los tratamientos evaluados fueron cuatro y estuvieron

representados por cada material de cubierta del macrotúnel: plástico verde, plástico transparente (ambos de 180 μm de espesor y transmisibilidad de 85-92 %), malla blanca con densidad de 10 \times 20 hilos cm^{-1} (50 mesh) y como testigo el cultivo en campo abierto. El diseño experimental fue completamente al azar con seis repeticiones y la unidad experimental consistió de 10 plantas, las cuales se distribuyeron completamente al azar en una cama de 80 cm de ancho \times 2.0 m de largo; únicamente seis plantas se utilizaron para el registro de los datos de las variables consideradas en el estudio.

Producción de plántula y manejo agronómico

La semilla de chile de agua utilizada fue de la variedad local Abasolo y la germinación se hizo en charolas de poliestireno expandido de 200 cavidades, utilizando como sustrato una mezcla de turba *Sphagnum* + Agrolita (70:30 v/v). Cuarenta días después de la germinación se realizó el trasplante al suelo con acolchado plástico a una densidad de 3 plantas m^{-2} (1.9 \times 0.35 \times 0.35 m entre camas, hileras y plantas respectivamente). La prevención y control de plagas y enfermedades se realizó con productos biológicos y el control de malezas se hizo manualmente.

Ambiente en el macrotúnel

Durante los dos ciclos de cultivo se monitoreó cada 5 min la T ($^{\circ}\text{C}$) y HR (%) ambiental dentro de cada macrotúnel y en campo utilizando sensores Hobo[®] Pro V2 data logger (Onset Computer Corporation, Pocasset, Massachusetts, EUA) instalados al centro de cada macrotúnel y en campo abierto a una altura de 0.70 m respecto al nivel de suelo. Con la temperatura y humedad relativa media diaria se calculó el diferencial de presión de vapor mediante la ecuación de Rosenberg *et al.* (1983). La RFA se obtuvo también cada 5 mins con un sensor lineal cuántico MQ-300 (Apogee Instruments Inc., Logan, Utah, EUA).

VARIABLES EVALUADAS

La altura de la planta (cm) y el diámetro del tallo (mm) se obtuvieron utilizando una cinta métrica flexible y un vernier digital marca Truper[®], respectivamente. La cosecha de frutos se realizó cuando estos alcanzaron la madurez fisiológica (cambio de color verde oscuro a verde claro o alimonado y brillante) y un tamaño de 7 a 12 cm de longitud, debido a que este fruto se comercializa en verde, antes de que ocurra el cambio de color verde a rojo. Se realizaron seis cortes en cada ciclo y se registró el peso de los frutos utilizando una balanza analítica digital (Modelo MS-L, Marca Mettler Toledo[®], Columbus, Ohio, EUA).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se procesaron mediante un análisis de varianza Kruskal-Wallis de un factor en rangos ($P \leq 0.01$) y la prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Se efectuó un análisis de correlación de Pearson ($P \leq 0.05$) para determinar la relación entre DPV y el rendimiento en los dos ciclos de cultivo. Todos los análisis se realizaron en el programa estadístico Sigma Plot[®] 12 (Systat Software, Inc., San José, California, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Radiación fotosintéticamente activa

En el ciclo O-I y en comparación con el cultivo en campo, la RFA transmitida a través de los diferentes materiales de cubierta de los macrotúneles se redujo, sin mostrar diferencias significativas entre ellas (Figura 1a); sin embargo, el valor medio de la RFA a las 12:00 h bajo la cubierta de PV fue significativamente mayor al de las cubiertas PT y MB, con un valor medio de 1594 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sin superar a la RFA en campo, que fue de 1814 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y que también fue el mayor flujo de la RFA para este ciclo. En el ciclo P-V, el comportamiento de la RFA fue similar (Figura 1b). El mayor flujo de RFA mostró un valor máximo de 2186 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en campo y flujos máximos de 1569, 1550 y 1585 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, transmitidos bajo las cubiertas de PV, PT y MB, respectivamente. Para la misma localidad y a pleno sol, Ramos-López *et al.* (2017) reportaron valores medios de RFA de 2166 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, cercanos al obtenido en las mismas condiciones para el ciclo P-V del presente estudio y también obtuvieron valores de 1752 y 1694 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, transmitidos bajo las cubiertas de polietileno transparente y malla blanca en cultivo bajo invernadero de tomate de cascara *Physalis ixocarpa* Brot., en el ciclo otoño-invierno 2016.

Temperatura

En los dos ciclos agrícolas evaluados, las temperaturas medias diurnas bajo las cubiertas de PT y PV fueron significativamente mayores que bajo la cubierta de malla blanca y campo (Figuras 2a y 2b). En el ciclo O-I, los valores medios diurnos fueron de 29.43, 29.93, 27.01 y 24.75 $^{\circ}\text{C}$, para PT, PV, MB y campo, respectivamente, mientras que para el ciclo P-V fueron de 30.90, 30.40, 27.60 y 26.53 $^{\circ}\text{C}$, en el mismo orden, valores que fueron ligeramente superiores a los presentados en el ciclo O-I. Estos valores promedio de temperatura son aceptables para el cultivo de la mayoría de las especies del género *Capsicum*, como lo indicaron Pérez-Jiménez *et al.* (2019) en pimiento dulce, cuyo cultivo estuvo sometido a temperaturas elevadas de 43 $^{\circ}\text{C}$ sin provocar estrés en las

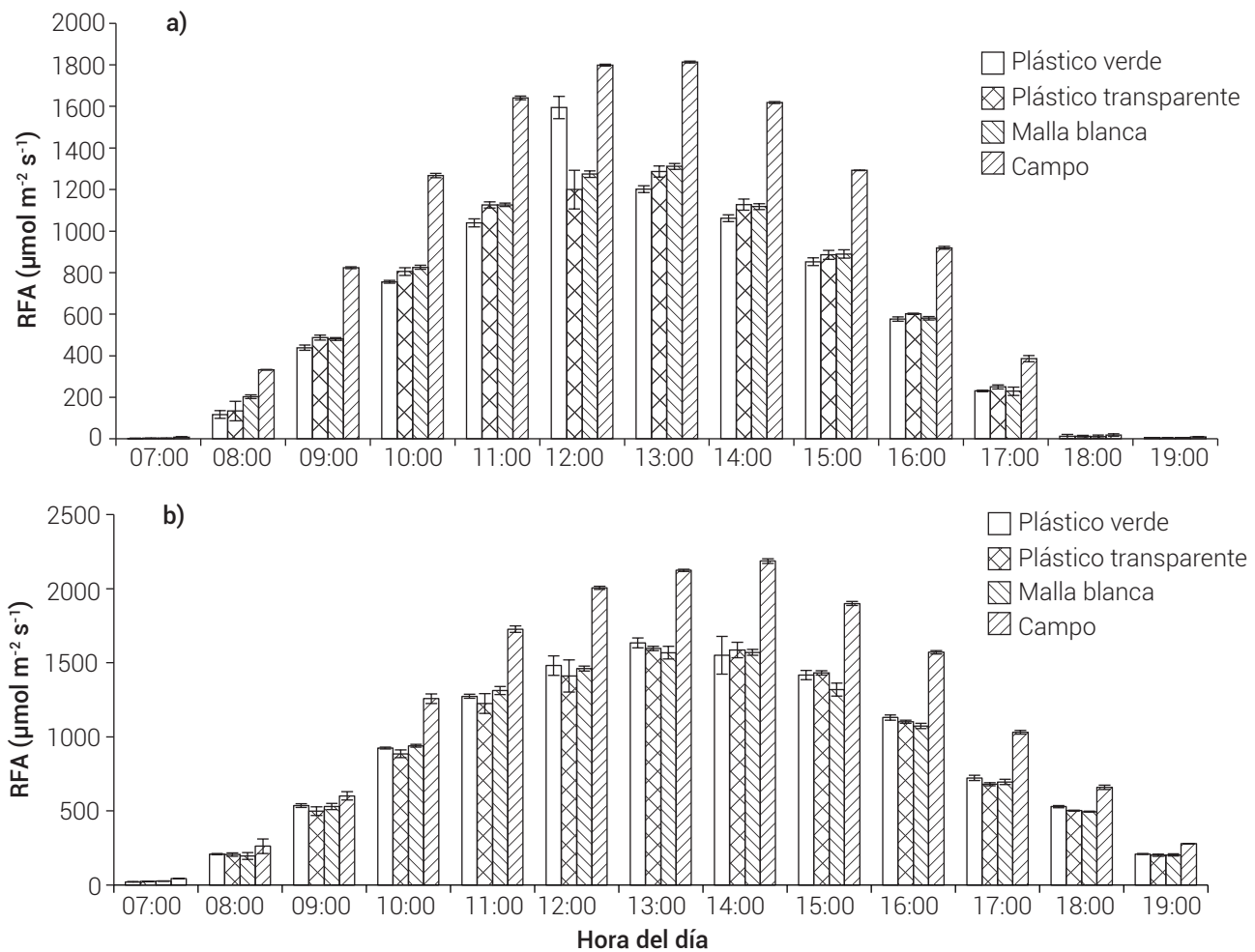


Figura 1. Radiación fotosintéticamente activa (RFA) recibida por las plantas de chile de agua en macrotúneles con diferentes cubiertas y en campo en los ciclos otoño-invierno 2016 (a) y primavera-verano 2017 (b). Promedio de cinco mediciones ± error estándar por cada hora del día.

plantas, aumentando la fotosíntesis y concentración de nitrato, bajo una alta concentración de CO₂, de manera que el choque térmico para los microambientes con cubierta de PT y de PV no tuvo un efecto negativo para la planta. En estructuras de protección, el área de ventilación está fuertemente relacionada con la disminución o aumento de la temperatura y otras variables climáticas (Castilla, 2007); en las condiciones de la cuenca mediterránea el valor óptimo del área de ventilación para disminuir las altas temperaturas es de 18 a 25 % de la superficie del suelo cubierta por el invernadero (Zabeltitz, 2002) y del 15 al 20 % en macrotúneles o túneles individuales (Castilla, 2007); sin embargo, en ausencia de estudios específicos para macrotúneles en esta región de México, se tuvo en cada estructura de protección evaluada 61.5 % del área de ventilación, que supera lo recomendable y que modificó el microambiente en el interior de los macrotúneles.

Humedad relativa

En los dos ciclos de cultivo de chile de agua se encontraron diferencias significativas entre cubiertas y campo para la humedad relativa (HR) media diaria. Durante todo el día, en el ciclo O-I, la HR bajo las diferentes cubiertas de macrotúneles fue en promedio 56.63 %, sin mostrar diferencias significativas entre ellas, pero sí con la HR registrada en campo, la cual fue 8 % mayor (Figura 2c). Durante el ciclo P-V, la HR bajo la cubierta de malla blanca fue inestable: de las 7 a las 11 h presentó el máximo valor, cercano al 82 % y de las 14 a las 19 h el más bajo de los cuatro ambientes, con valor medio del 22 % (Figura 2d). Debido a que no se encontraron diferencias entre los cuatro ambientes a medio día (de 11 a 14 h) y por el corto tiempo de exposición, no se afectó al cultivo, pues de acuerdo con Singha *et al.* (2012), la superficie foliar de las plantas de cualquier cultivo bajo ambiente protegido

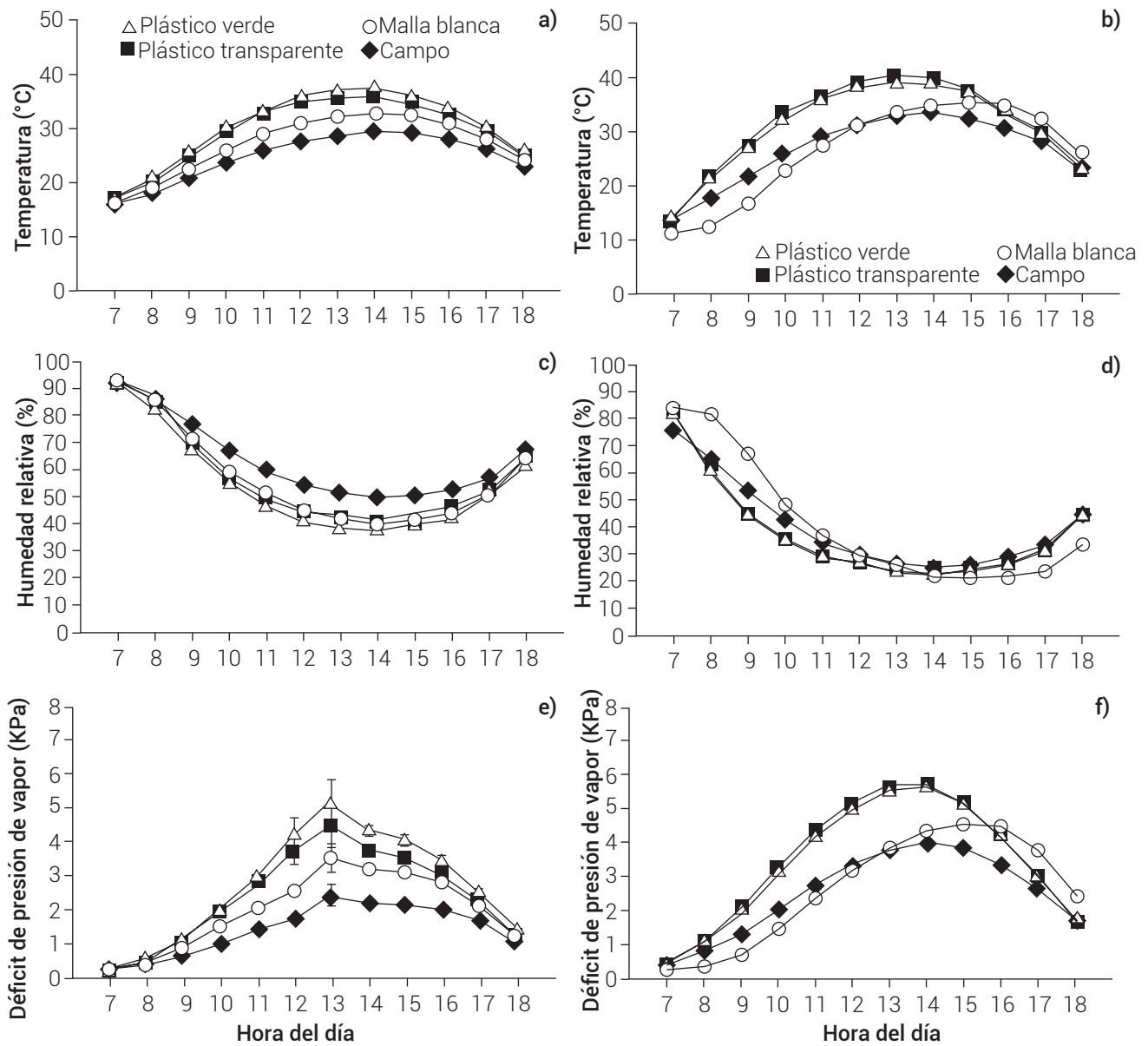


Figura 2. Comportamiento de la temperatura (a y b), humedad relativa (c y d) y déficit de presión de vapor (e y f) en el interior de los macrotúneles con diferentes cubiertas y en campo, en los ciclos otoño-invierno 2016 (Izquierda) y primavera-verano 2017 (Derecha) en el cultivo de chile de agua.

disminuye significativamente para tiempos prolongados de exposición a HR elevadas (entre 70 y 80 %). En este estudio, el promedio general de los tres tratamientos bajo ambiente protegido fue de 56.64 y 39.51 %, para los ciclos O-I y P-V, respectivamente, que es un promedio adecuado para cultivos hortícolas. Castilla (2007) recomienda para diversos cultivos hortícolas bajo ambientes protegidos una HR media óptima de entre 50 y 60 %. En esta investigación, ambos ciclos registraron este umbral de HR con una media ligeramente menor para el ciclo P-V. Li *et al.* (2006) observaron que en ambiente protegido similar a

este experimento se obtuvieron mayores rendimientos con temperatura de 32.2 °C y 52 % de HR; este umbral resultó apropiado para el cultivo de pimiento en las poblaciones de Santa Lucía Escuintla y el Tablón Sololá, en Guatemala, cuyos experimentos se realizaron combinando malla blanca y cubierta plástica transparente (Porres *et al.*, 2014).

Déficit de presión de vapor

El déficit de presión de vapor mostró diferencia significativa ($P \leq 0.01$) entre cubiertas de macrotúneles y

campo para los dos ciclos de cultivo. Para O-I, de las 8 a 11 h el DPV no mostró diferencia entre las cubiertas de PV y PT (Figura 2e). El máximo valor medio diario del DPV, bajo las cubiertas y en campo, se alcanzó entre las 12 y 13 h y entre cubiertas el mayor DPV se obtuvo bajo el PV y PT con 3.35 y 3.44 kPa, respectivamente, por lo que, para esta variable, presentaron el mejor ambiente para el cultivo de chile de agua.

En el ciclo P-V, el comportamiento de la DPV mostró dos pares de grupos; el primero conformado por el PV y PT y el segundo por la malla blanca y campo, con clara diferencia significativa entre grupos. En el primer grupo, el máximo valor de DPV se registró entre las 12 y las 13 h con 5.1 kPa, mientras que, para el segundo, fue entre las 14 y 15 h con 4.5 kPa (Figura 2f); ésto se debió a que el valor máximo de temperatura también se presentó en estos momentos del día. De acuerdo con Shamshiri *et al.* (2018), el DPV óptimo para un cultivar de tomate bajo clima controlado se ubica entre 1.43 y 2.25 kPa, el primero como umbral adecuado y el segundo como no deseado, teniendo el primero efecto positivo en el desarrollo vegetativo y en la floración, hasta la fructificación. A la vez, Anjum *et al.* (2011) mencionan que a largo plazo la fotosíntesis disminuye en respuesta a la sequía atmosférica, la cual es considerada como un período de tiempo prolongado en que la humedad del suelo es extremadamente baja y el DPV es alto, pudiendo limitar el crecimiento de plantas, la acumulación de materia seca y, por lo tanto, disminuir el rendimiento; en este sentido, aun cuando en este estudio se podría disminuir el DPV con métodos pasivos de ventilación (Katsoulas *et al.*, 2006; Villarreal-Guerrero *et al.*, 2012), este recurso no fue necesario porque el tiempo de exposición del cultivo en los ciclos P-V y O-I a los efectos del DPV, fueron por periodos muy cortos.

En ambos ciclos de cultivo, el rendimiento de las plantas de chile de agua aumentó linealmente en función del DPV del ambiente generado por las cubiertas plásticas (Figura 3). El menor rendimiento se obtuvo en el ciclo O-I y aunque en ambos ciclos la relación fue lineal ($R^2 = 0.904$; $P = 0.049$), el valor del estadístico P fue mayor que en el ciclo P-V ($R^2 = 0.965$; $P = 0.017$).

Variables morfológicas y rendimiento

Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) entre cubiertas de macrotúneles y campo para las variables altura de la planta, diámetro del tallo y rendimiento (Cuadro 1). En los dos ciclos de cultivo evaluados el rendimiento fue superior bajo macrotúneles con cubierta de PT y PV, sin mostrar diferencias estadísticas significativas entre ellos ($P \leq 0.01$). En el ciclo P-V y bajo la cubierta de PT, el rendimiento fue 328 % superior (6.08 kg m^{-2}) al obtenido

en campo (1.85 kg m^{-2}) y en O-I fue 608 % (1.46 kg m^{-2}) mayor al obtenido también en campo (0.24 kg m^{-2}). Este aumento en el rendimiento bajo cubiertas de policarbonato traslúcido y polietileno difuso en macrotúneles también fue reportado por Zermeño-González *et al.* (2019) en chile poblano. El rendimiento en campo abierto, para el ciclo P-V del presente estudio, fue superior al obtenido por Aparicio-del-Moral *et al.* (2013) en el mismo cultivo, quienes reportaron un rendimiento de fruto de 0.379 kg m^{-2} también en campo y para la misma región.

La altura de planta presentó diferencias estadísticas significativas para los diferentes tipos de cubierta utilizados y entre los ciclos de cultivo evaluados. En el ciclo O-I, las plantas alcanzaron mayor altura bajo las cubiertas plásticas transparente y verde (77.40 y 73.17 cm, respectivamente) con respecto a la malla blanca y en campo (57 y 27 cm, respectivamente); en P-V, las tres cubiertas plásticas no mostraron diferencias significativas entre ellas para esta variable y las plantas de chile de agua tuvieron en promedio 62.16 cm de altura. Lo anterior muestra que en el ciclo O-I las plantas cultivadas, tanto bajo el plástico transparente como en el verde, alcanzaron mayor altura que las cultivadas bajo las mismas cubiertas, pero en P-V; este proceso de alargamiento es una respuesta a la reducción de la luz y puede ocasionar una disminución del rendimiento (Salisbury y Ross, 2000), como aconteció en el presente estudio; sin embargo, con la cubierta de malla blanca y campo abierto las plantas tuvieron mayor altura en el ciclo P-V, con respecto al ciclo O-I, lo cual está asociado con las menores temperaturas mostradas en este último ambiente ya que al disminuir la temperatura se reduce la tasa fotosintética y el crecimiento. El diámetro del tallo mostró diferencias estadísticas significativas entre las tres cubiertas plásticas y campo para el ciclo O-I, con un valor promedio de 7.5 mm, no así para el ciclo P-V, donde en los cuatro ambientes se alcanzó un valor cercano a 8.0 mm. Este comportamiento del tallo aún no está claramente definido para especies vegetales bajo estructuras de protección de porte bajo (Castilla, 2007); sin embargo, es probable que para este parámetro haya influido el bajo potencial genético de la semilla "criolla" utilizada, como lo indica Carrillo *et al.* (2009) para este mismo tipo de chile. La altura de planta y diámetro de tallo obtenidos en el presente estudio fueron menores a lo reportado por Martínez-Sánchez *et al.* (2010), quienes obtuvieron valores de 108 a 118 cm de altura y 8.54 a 10.13 mm de diámetro del tallo, en plantas cultivadas en un invernadero con cubierta de vidrio en Texcoco, México.

Estas diferencias en el rendimiento del cultivo, entre ciclos y entre cubiertas, se pueden atribuir a la diferencia entre la RFA en el ciclo P-V ($2186 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y la RFA en el ciclo O-I ($1814 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), así también a los valores del

DPV bajo el PT y PV, que se mantuvieron por encima del valor de 5.0 kPa durante cuatro horas (de 11:00 a 15:00 h) en la mayoría de los días soleados (Figura 2e y 2f), creando un ambiente más favorable para el cultivo, lo que coincide con lo reportado por Shamshiri *et al.* (2018) en el cultivo de pimiento morrón en invernadero. Fue particularmente durante el ciclo O-I donde el DPV medio diario en el macrotúnel con cubierta de PV superó ligeramente el valor de 5 kPa en el intervalo de 12-13 h (Figura 2e). En este ciclo, los tres tratamientos y el control siguen la misma tendencia y presentan un pico del DPV.

En todos estos valores promedio no se encontró una deficiencia en HR del ambiente dentro del macrotúnel que pudiera limitar significativamente el crecimiento de las plantas, la acumulación de materia seca y, por lo tanto, disminuir el rendimiento; sin embargo, comparando

ambos ciclos, la mayor altura y el menor rendimiento se registraron en las plantas del ciclo O-I (Figura 2e y Cuadro 1), que fue en el ciclo en donde la RFA promedio (1594 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) fue menor, al igual que la temperatura.

CONCLUSIONES

En los dos ciclos de cultivo de chile de agua las cubiertas de los macrotúneles, en comparación con el testigo en campo, disminuyeron la RFA, HR y el DPV, aumentando la temperatura, sin presentar diferencias estadísticas significativas entre los tres tipos de cubiertas. Empero, el uso de macrotúneles con cubiertas plásticas generó mejores microambientes para el desarrollo del cultivo, lo que favoreció la obtención de mayores rendimientos de fruto, tanto en el ciclo de otoño-invierno como en el de primavera-verano. Por lo tanto, se recomienda el uso de

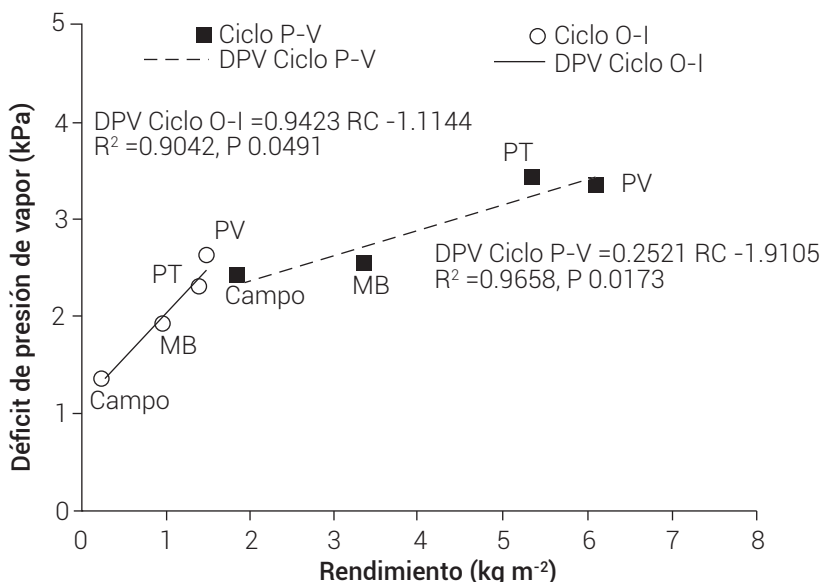


Figura 3. Relación entre el rendimiento de chile de agua y el déficit de presión de vapor (DPV) en macrotúneles con cubierta de plástico verde (PV), plástico transparente (PT), malla blanca (MB) y el testigo en campo, en dos ciclos de cultivo: otoño-invierno (O-I) y primavera-verano (P-V).

Cuadro 1. Caracteres morfológicos de plantas de chile de agua y rendimiento de los cultivos en macrotúneles con tres cubiertas plásticas, durante dos ciclos de cultivo.

Cubierta	Altura de planta (cm)		Diámetro del tallo (mm)		Rendimiento (kg m ⁻²)	
	O-I 2016	P-V 2017	O-I 2016	P-V 2017	O-I 2016	P-V 2017
Plástico verde	73.17aA	61.83aB	8.06aA	8.29aA	1.39aB	5.36aA
Plástico transparente	77.40aA	61.30aB	7.72abA	7.97aA	1.46aB	6.08aA
Malla blanca	57.42bA	63.35aA	6.84bB	8.04aA	0.97bB	3.36bA
Campo abierto	27.93cB	47.71bA	5.53cB	7.65aA	0.24cB	1.85cA

O-I: otoño-invierno; P-V: primavera-verano. Medias con la misma letra no presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, P ≤ 0.05). Medias con letras minúsculas se comparan en columnas o vertical y mayúsculas se comparan horizontalmente o fila dentro de cada variable.

plástico transparente, plástico verde y malla blanca en este orden de prioridad, como cubiertas de macrotúneles para el cultivo de chile de agua bajo condiciones ambientales similares a las de la región del estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, por el financiamiento otorgado a la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Anjum S. A., X. Y. Xie, L. C. Wang, M. F. Saleem, C. Man and W. Lei (2011) Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research* 6:2026-2032, <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>
- Aparicio-del-Moral J. O., M. A. Tornero-Campante, E. Sandoval-Castro, L. A. Villarreal-Manzo y M. A. Rodríguez-Mendoza (2013) Factores sociales y económicos del cultivo de chile de agua (*Capsicum annuum* L.) en tres municipios de los valles centrales de Oaxaca. *Ra Ximhai* 9:17-24.
- Baille A., J. C. López, J. Cabrera, M. M. González-Real and J. Pérez-Parra (2003) Characterization of the solar diffuse component under "parral" type greenhouses. *Acta Horticulturae* 614:341-346, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.614.51>
- Carrillo E. P., J. A. Mejía C., A. Carballo C., G. García S., V. H. Aguilar R. y T. Corona T. (2009) Calidad de semilla en colectas de chile de agua (*Capsicum annuum* L.) de los valles centrales de Oaxaca, México. *Agricultura Técnica en México* 35:257-266.
- Castellón-Martínez E., J. L. Chávez-Servia, J. C. Carrillo-Rodríguez y A. M. Vera-Guzmán (2012) Preferencias de consumo de chiles (*Capsicum annuum* L.) nativos en los valles centrales de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:27-35, <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.Especial.5.27>
- Castilla N. (2007) Invernaderos de Plástico, Tecnología y Manejo. Mundi Prensa. Madrid, España. 462 p.
- García M. L., E. Medrano, M. C. Sánchez-Guerrero and P. Lorenzo (2011) Climatic effects of two cooling systems in greenhouses in the Mediterranean area: external mobile shading and fog system. *Biosystems Engineering* 108:133-143, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.006>
- Juárez L. P., R. Bugarián M., R. Castro B., A. L. Sánchez-Monteón, E. Cruz-Crespo, C. R. Juárez R., ... y R. Balois M. (2011) Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente* 3:21-27.
- Katsoulas N., T. Bartzanas, T. Boulard, M. Mermier and C. Kittas (2006) Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation. *Biosystems Engineering* 93:427-436, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.01.001>
- Li S., D. H. Willits and C. A. Yunker (2006) Experimental study of a high pressure fogging system in naturally ventilated greenhouses. *Acta Horticulturae* 719:393-400, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.44>
- López L. P. S. y F. H. Castro G. (1989) Al rescate de la diversidad del chile (*Capsicum* spp.) en Oaxaca. Publicación Especial. Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca. INIFAP. Oaxaca, México. 7 p.
- López-Marín J., A. Gálvez, A. González, C. Egea-Gilabert and J. A. Fernández (2012) Effect of shade on yield, quality and photosynthesis-related parameters of sweet pepper plants. *Acta Horticulturae* 956:545-552, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.65>
- Martínez-Sánchez D., M. Pérez-Grajales, J. E. Rodríguez-Pérez y E. C. Moreno-Pérez (2010) Colecta y caracterización morfológica de 'chile de agua' (*Capsicum annuum* L.) en Oaxaca, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 16:169-176.
- Pérez-Jiménez M., M. C. Piñero and F. M. del Amor (2019) Heat shock, high CO₂ and nitrogen fertilization effects in pepper plants submitted to elevated temperatures. *Scientia Horticulturae* 244:322-329, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.072>
- Porres V., R. Cifuentes y E. León (2014) Evaluación de tres tipos de cubierta para macrotúneles sobre el microclima y productividad de chile pimiento (*Capsicum Annuum*) en Escuintla y Solalá. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala* 27:82-92.
- Ramos-López B. I., G. A. Martínez-Gutiérrez, I. Morales, C. Escamirosa-Tinoco y A. Pérez-Herrera (2017) Consumo de agua y rendimiento de tomate de cáscara bajo diferentes cubiertas de invernaderos. *Horticultura Brasileira* 35:265-270, <https://doi.org/10.1590/S0102-053620170218>
- Rosenberg N. J., B. L. Blad and S. B. Verma (1983) Microclimate: the Biological Environment. 2nd edition. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, USA. 495 p.
- Salisbury F. y C. Ross (2000) Fisiología de las Plantas. Vol. 1. Paraninfo-Thomson Learning. Madrid, España. 305 p.
- Secretaría de Economía (2008) Norma Mexicana NMX-E-255-CNCP-2008. Invernaderos-Diseño y Construcción-Especificaciones. Diario Oficial de la Federación, edición 8 de julio 2008. México, D. F.
- Segura M. I. y C. Cadahía (2000) Fertirrigación de cultivos hortícolas. In: Fertirrigación, Cultivos Hortícolas y Ornamentales. C. Cadahía (ed.). Mundi-Prensa. Madrid, España. pp:343-415.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2001) Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, edición 17 de octubre de 2000. México, D. F. 83 p.
- Shamshiri R. R., J. W. Jones, K. R. Thorp, H. C. Ahmad Dman and S. Taheri (2018) Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics* 32:287-302, <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (2017) Anuario estadístico de la producción agrícola. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/Agosto2017>.
- Singha A., A. B. Syndor, B. C. Bidyut, R. K. Singh and R. K. Patel (2012) The effect of microclimate inside low tunnels on off-season production of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Scientia Horticulturae* 144:36-41, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.06.025>
- Tanny J. (2012) Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: a review. *Biosystems Engineering* 114:26-43, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.008>
- Vargas-Ponce O., L. E. Valdivia-Mares y J. Sánchez-Martínez (2015) Potencial alimenticio de los tomates de cáscara (*Physalis* spp.) de México. *Agroproductividad* 8:17-23.
- Villarreal-Guerrero F., M. Kacira, E. Fitz-Rodríguez, R. Linker, C. Kubota, G.A. Giacomelli and A. Arbel (2012) Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling. *Biosystems Engineering* 111:217-228, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.015>
- Zabeltitz C. V. (2002) Greenhouse structures. In: Ecosystems of the World 20: Greenhouse Ecosystems. G. Stanhill and H. Z. Enoch (eds.). Elsevier Sciences B. V. Amsterdam, The Netherlands. pp:17-71p.
- Zermeño-González A., J. A. Marroquín-Morales, A. I. Melendres-Álvarez, H. Ramírez-Rodríguez, M. Cadena-Zapata y S. G. Campos-Magaña (2019) Propiedades espectrales de la cubierta de macro-túneles y su relación con el crecimiento y rendimiento de chile poblano (*Capsicum annuum* L.). *Terra Latinoamericana* 37:253-260, <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.473>