

## Predicción de la transmitancia de un invernadero con techo removible

Adrián Flores Ortega<sup>1§</sup>, Gerardo Martínez Soto<sup>1</sup> y J. Concepción Quiroz Ramírez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Ciencias de la Vida- Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao km 9, C. P. 36500, Ex Hacienda El Copal. Irapuato, Guanajuato. (martige@ugto.mx), (quiroz@ugto.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: floresoa@ugto.mx.

### Resumen

En el presente trabajo se desarrolló un procedimiento para predecir teóricamente y verificar experimentalmente la transmitancia de un invernadero con techo removible, localizado en Irapuato, Guanajuato. Se consideraron los factores más importantes tales como: posición geográfica (latitud), posición del sol en el cielo, geometría del techo, orientación del invernadero, características radiométricas del material de la cubierta y las condiciones meteorológicas locales. Las diferencias entre los resultados teóricos y los experimentales varían entre 4% y 10.8%, entre la zona más despejada y la más sombreada, respectivamente, en el interior del invernadero. Los valores teóricos son 10.84% menores a las especificaciones comerciales de la transmisividad del material de la cubierta. Esta información puede ser de utilidad para tomar decisiones durante la selección de un invernadero, el tipo de cultivo que se va instalar y el manejo para el control del microclima.

**Palabras clave:** control, microclima, pronóstico.

### Introducción

Los invernaderos son construcciones agrícolas con cubierta transparente, cuyo objetivo es atrapar la energía solar y crear artificialmente las condiciones ambientales que requieren las plantas. El desempeño de un invernadero en cuanto a la formación del microclima interior, depende de muchos factores, tales como el diseño (forma), las propiedades ópticas y térmicas del material de la cubierta, la orientación respecto a los ejes cardinales, las condiciones climáticas

locales, así como el tipo y desarrollo del cultivo. Un invernadero modifica el clima mediante la regulación de la entrada de la energía solar y el intercambio de aire con el exterior (Baile, 2003).

Cuando el invernadero es de baja tecnología, no cuenta con calefacción, entonces la fuente de energía es la que proviene del sol y la capacidad de captación de esa energía, es indicada por la transmitancia ( $\tau$ ), la cual es definida como la fracción de energía solar incidente que logra penetrar a través de la cubierta (Boulard *et al.*, 2000; Castilla, 2001; Baille, 2003).

$$\tau = \frac{\text{Energía solar en el interior}}{\text{Energía solar en el exterior}} \quad 1)$$

Este parámetro depende de las propiedades ópticas del material de cubierta, del ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie y de otros factores difíciles de controlar, tales como acumulación de polvo, envejecimiento, condensación de vapor de agua, etc. (Castilla, 2001).

Para un tipo de material dado, el ángulo de incidencia es determinante para que la energía solar pase a través de la cubierta. En la Figura 1 se muestra el porcentaje de transmisividad en dos tipos de material de cubierta en función del ángulo de incidencia.

La dirección de la radiación solar sobre una superficie plana inclinada un ángulo respecto a la horizontal (Figura 1), está dada por la siguiente relación (University of Oregon, 2003):

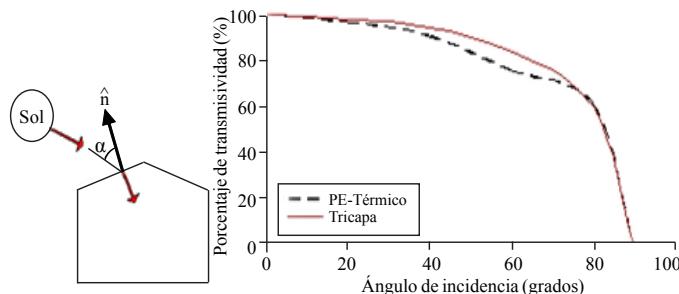


Figura 1. Ángulo de incidencia (a) y transmisividad.

$$\begin{aligned} \text{Cosa} = & \text{Sen}\theta \text{Sen}\lambda \text{Cos}\sigma - \text{Sen}\theta \text{Cos}\lambda \text{Sen}\sigma \text{Cos}\varphi + \text{Cos}\theta \text{Cos}\lambda \\ & \text{Cos}\sigma \text{Cos}\omega + \text{Cos}\theta \text{Sen}\lambda \text{Sen}\sigma \text{Cos}\omega \text{Cos}\varphi + \text{Cos}\theta \text{Sen}\varphi \text{Sen}\omega \end{aligned} \quad 2)$$

Donde:  $\theta$ =declinación solar;  $\lambda$ =latitud del lugar;  $\sigma$ =ángulo de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal;  $\omega$ =ángulo horario;  $\varphi$ =ángulo de dirección. Para cuando la superficie está inclinada hacia el este ( $\varphi= -90^\circ$ ) o hacia el Oeste ( $\varphi= 90^\circ$ ), la relación se simplifica de la siguiente manera:

$$\text{Cosa} = \text{Sen}\theta \text{Sen}\lambda \text{Cos}\sigma - \text{Cos}\theta \text{Cos}\lambda \text{Cos}\sigma \text{Cos}\omega \pm \text{Cos}\theta \text{Sen}\omega \quad 3)$$

El objetivo del presente trabajo es utilizar estos modelos matemáticos para predecir la capacidad de captación de energía solar en un invernadero, considerando factores fundamentales tales como la latitud del lugar, la geometría del techo, la orientación respecto a los ejes cardinales y las propiedades radiométricas del material de cubierta. Posteriormente, comparar los valores teóricos con los resultados de mediciones directas de la radiación solar, tanto en el interior como en el exterior del invernadero.

## Material y métodos

La evaluación de la transmitancia, se llevó a cabo en un invernadero con techo removible, localizado en el campo experimental de la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato, ubicado en el Copal, municipio de Irapuato, Guanajuato (Figura 2).

El techo es semicircular con orientación norte-sur, cubierto con polietileno térmico calibre 800 con transmisividad de 83%. La particularidad del invernadero es que en el techo

tiene una ventana de 2 m de ancho, protegida con malla antiáfidos de 1610 hilos  $\text{cm}^{-2}$ . La altura máxima es de 6 m y cubre una superficie de suelo de 300  $\text{m}^2$ . El cultivo establecido fue jitomate.



Figura 2. Vista exterior e interior del invernadero.

Para la validación experimental de los valores previstos, se utilizó la información climatológica de la estación meteorológica El Copal de la Fundación Guanajuato Produce A. C., que publica la información de temperatura y humedad del aire, la radiación solar global, la velocidad y dirección del viento y se localiza a unos 300 m del invernadero. Adicionalmente se utilizó una estación meteorológica Vantage Pro2 Plus de la marca Davis, que fue instalada en el interior del invernadero para medir la radiación solar global, la temperatura y humedad del aire. Adicionalmente se utilizó un medidor de luz PAR de la marca Extech modelo 401020, con el que se midió la radiación PAR, tanto en el interior como en el exterior del invernadero.

Las mediciones de la radiación solar global y la radiación PAR, se efectuaron durante los meses de abril y mayo, considerándose las horas soleadas durante tres días consecutivos y los registros de los datos se realizaron cada 15 min para después considerar sólo el promedio durante una hora. La transmitancia del invernadero se determinó dividiendo la radiación solar global en el interior entre la radiación solar global en el exterior para el mismo tiempo, según la definición (Ecuación 1).

Para simplificar la incidencia de la radiación solar en el modelo teórico, la curva semicircular del techo se seccionó en segmentos de líneas rectas continuas de un metro de ancho, para generar superficies planas como se muestra en la Figura 2. Se midió el ángulo de inclinación ( $s$ ) de cada superficie plana con respecto a un plano horizontal, para que con la Ecuación 3 se pudiera calcular el ángulo de incidencia de la radiación solar.

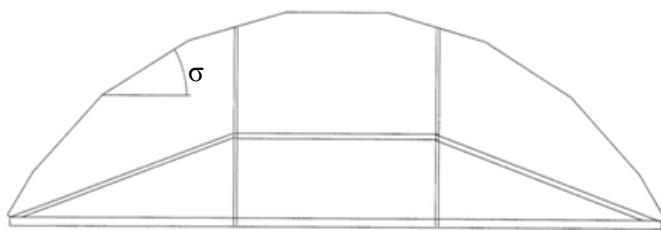


Figura 3. Ajuste del contorno curvo a secciones planas.

Una vez conocido el ángulo de incidencia de la radiación solar global, sobre cada una de las superficies planas en que se seccionó el techo, la atenuación de la radiación se calculó interpolando sobre la gráfica de la Figura 1, para posteriormente obtener un valor promedio durante una hora.

## Resultados y discusión

La disponibilidad de energía solar en el interior del invernadero es diferente para cada zona, así en la Figura 4 se muestra el comportamiento de la radiación global exterior e interior en la parte media de una nave del invernadero; mientras que en la Figura 5, muestra el comportamiento de la radiación solar en el centro del invernadero, debajo de una canaleta.

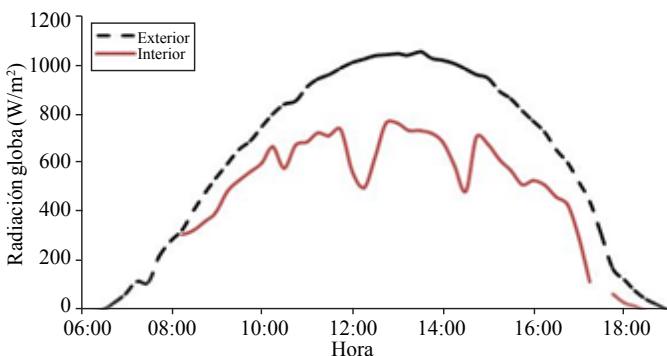


Figura 4. Radiación global en la parte central de una nave.

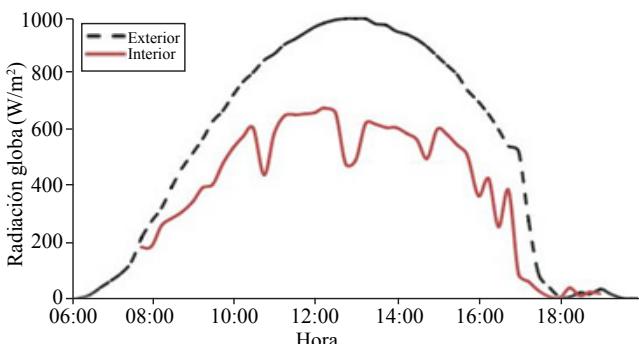


Figura 5. Radiación global debajo de la canaleta.

Como se puede observar, la radiación en el exterior es mayor que en el interior, debido a las limitaciones que ofrecen la cubierta, el ángulo de incidencia con que actúan los rayos solares sobre su superficie y la propia estructura del invernadero (Wang, 2000).

En la Figura 6 se presenta la transmitancia teórica y experimental del invernadero para las condiciones cuando la planta tiene poca altura (1 m), los valores son muy parecidos, inclusive la transmitancia experimental es ligeramente superior a la transmitancia teórica, en parte puede deberse a que la radiación reflejada por el suelo es considerable.

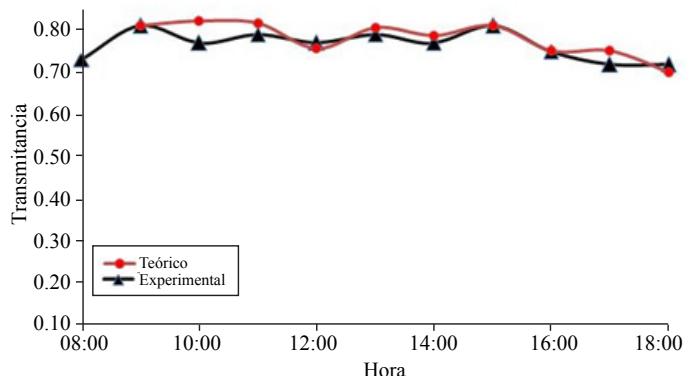
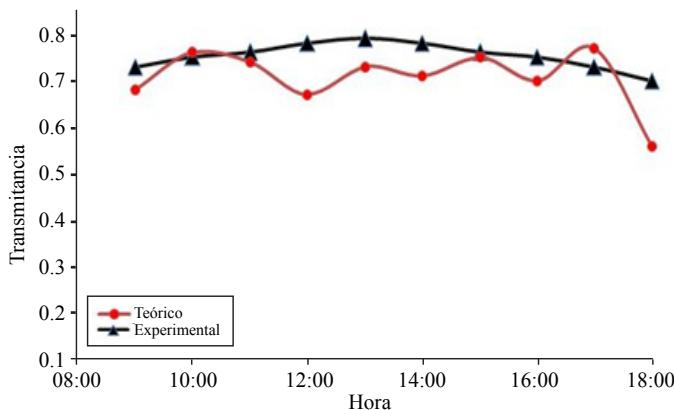


Figura 6. Transmitancia del invernadero con plantas pequeñas (1 m).

Para estas condiciones la transmitancia teórica es de 0.76 con desviación estándar de 0.03; mientras que la transmitancia experimental es de 0.78 con desviación estándar de 0.04. Ambos valores son menores a las especificaciones comerciales del material (Enoch, 1986).

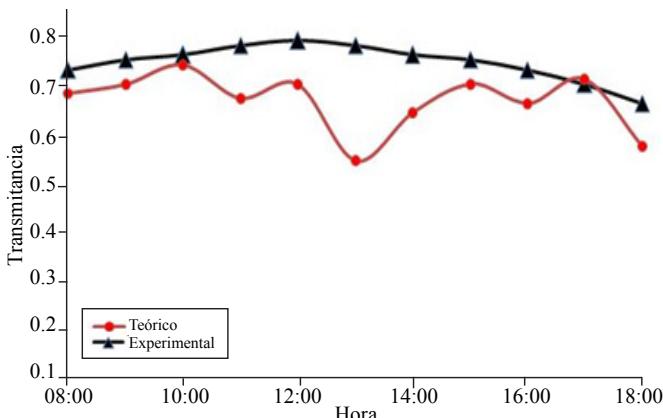
En la Figura 7 se muestra la transmitancia para cuando la planta tiene 2 m de altura, se observó que los valores teóricos fueron más grandes que los valores experimentales, lo cual es más razonable porque en realidad la geometría del invernadero se deforma debido al envejecimiento del polietileno y a la acumulación de polvo en la superficie. Un detalle que se observó es que en la parte media del techo, donde solo había malla antiáfidos, visiblemente penetraba más luz; sin embargo las mediciones de radiación global son menores que en el polietileno térmico. Esto coincide con sus respectivas especificaciones técnicas, mientras que el polietileno provoca un sombreo de 17%, la malla antiáfidos lo hace en 25%.

En estas condiciones la transmitancia teórica es de 0.74 con desviación estándar de 0.04, mientras que la transmitancia experimental es de 0.71 con desviación estándar de 0.06.



**Figura 7. Transmitancia del invernadero con plantas de 2 m de altura.**

En la Figura 8 se muestra el comportamiento de la transmitancia justo debajo de la canaleta, es de esperarse que la disponibilidad de radiación solar sea menor, debido a la obstrucción de la estructura, sobre todo alrededor del medio día, el sombreo llega a ser de 50%, el cual el modelo teórico no lo contempló. En estas condiciones, la transmitancia promedio teórica fue de 0.74, con una desviación estándar de 0.04 y la transmitancia experimental de 0.66 con desviación estándar de 0.06.



**Figura 8. Transmitancia debajo de la canaleta del invernadero.**

Para la misma localización geográfica y las mismas condiciones constructivas del invernadero, la transmitancia tiende a cambiar a lo largo del año. Se esperaría que los valores más grandes se registraran alrededor del medio día; sin embargo, no fue así, lo cual nos indica que para implementar alguna estrategia de sombreo, es necesario analizar los efectos que se obtendrán. En la mayoría de los casos la transmitancia teórica es mayor al valor experimental, ya que éste último está afectado por factores difíciles de cuantificar, tales como acumulación de polvo, deformación de la cubierta y detalles constructivos, aspectos que el modelo teórico no los considera.

En términos generales, para este tipo de invernadero y en esta situación geográfica, se puede considerar que el valor de la transmitancia estimado con el modelo, es 4% mayor que el valor experimental o que es 10.8% menor del valor especificado por el fabricante del material de la cubierta.

## Conclusiones

Es de mucha utilidad analizar los factores que intervienen en los fenómenos físicos, ya que permite entenderlos y ver su contribución. Pero es más importante relacionarlos mediante modelos matemáticos sencillos, que permitan cuantificar los fenómenos y regularlos de acuerdo a las necesidades específicas. Esto disminuye el tiempo y el costo de análisis comparado con los métodos experimentales.

Para el caso específico de la transmitancia de un invernadero, este parámetro puede ayudar a tomar decisiones para la selección de un invernadero, el tipo de cultivo que se va instalar y el manejo para la formación del microclima.

## Literatura citada

- Baile, A. 2003. Overview of greenhouse climate control in the mediterranean region. *Cahiers Options Méditerranéennes*. 31:59-73.
- Boulard, T. and Wang, S. 2000. Greenhouse crop transpiration model from external climate conditions. *Acta Hort.* 534:235-244.
- Castilla, N. 2001. La radiación solar en invernadero en la costa mediterránea española. In: incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo. López, J. C.; Lorenzo, P.; Castilla, N.; Pérez-Parra, J.; Montero, J.; Baeza, E.; Antón, A.; Fernández, M. D.; Baille, A. y González-Real, M. (Eds). ISBN: 84-95531-07-0. Editorial CAJAMAR. Almería, España. 35-49.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Editorial Mundi-Prensa. España. 37-146 pp.
- Enoch, H. Z. 1986. Climate and protected cultivation. *Acta Hort.* 176:11-2.
- University of Oregon. 2003. Solar radiation basics. Solar radiation monitoring. URL: (<http://solardat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.htm>).
- Wang, S. and Boulard, T. 2000. Measurement and prediction of solar radiation distribution in full-scale greenhouse tunnels. *Agronomie*. 20:41-50.