

MODELADO DE LA TRANSMITANCIA GLOBAL FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA DE MATERIALES UTILIZADOS EN INVERNADEROS EN URUGUAY

J. L. Di-Laccio^{1,2}, C. Barros³, A. Monetta¹, G. Vitale¹, R. Alonso-Suárez¹, G. Abal¹

¹Laboratorio de Energía Solar, Depto. de Física del CeNUR Litoral Norte, Universidad de la República

²Centro Regional de Profesores del Litoral (CeRP), Consejo de Formación en Educación

³Estación Exp. de la Facultad de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad de la República

E-mail: jdilaccio@unorte.edu.uy

RESUMEN: En este trabajo se estudia la transmitancia global para la radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) de diferentes coberturas (films) utilizadas en invernaderos. Se incluyen cuatro coberturas en su estado de fábrica y cuatro coberturas ya utilizadas, correspondiente al recambio cada tres años (techos norte y sur de cada invernadero). Dos de las coberturas en estado nuevo son de la misma marca y modelo que las de recambio. Se adapta para la transmitancia global PAR de estos films un modelo empírico de uso extendido para la transmitancia global de banda ancha en otras superficies. Este modelo usa como variable de entrada el ángulo de incidencia (θ) de la radiación directa sobre la superficie y tiene dos parámetros ajustables (τ_{np} y p). Se incluye además, a modo de referencia, la utilización de una transmitancia constante. Se observa que el modelo adaptado presenta un mejor desempeño que el modelo constante para toda condición de cielo y cielo despejado, reproduciendo con muy baja incertidumbre la transmitancia global PAR de cielo claro. La degradación de la transmitancia de las coberturas utilizadas por tres años en invernaderos reales se evalúa en 9-12 %, con una diferencia de 2 % entre su utilización con orientación norte o sur.

Palabras clave: transmitancia PAR, coberturas de invernaderos, degradación de coberturas, modelos de transmitancia PAR.

INTRODUCCIÓN

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) comprende la porción del espectro solar de banda ancha que está entre 400 y 700 nm. Esta región espectral es la principal fuente de energía para el proceso de fotosíntesis de las plantas y, por tanto, la PAR interceptada por el cultivo durante su ciclo es un factor determinante del rendimiento del mismo. Los cultivos a cielo abierto reciben un flujo de fotones PAR mayor al de cultivos protegidos bajo coberturas plásticas.

Los invernaderos en Uruguay son en su mayoría estructuras de madera, con techo a dos aguas, cubiertas con una película de plástico (films), y el cultivo es en suelo. La propia estructura del invernadero (cantidad y espesor de madera), la cobertura, y posterior acumulación de polvo y otras suciedades en ella, la condensación en ciertos períodos del ciclo, el sombreado por mallas de sombreado y/o aplicación de cal a fines de primavera-verano, entre otros factores, son causantes de reducción de la PAR incidente sobre el cultivo. El conocimiento de la transmitancia PAR de determinada cobertura y la estimación de la afectación que esta tiene en el tiempo y para una región geográfica dada, es una herramienta útil para el diseño, construcción, y manejo de estas infraestructuras de producción. En particular, permite tener elementos de decisión para la selección de mejores films de acuerdo a los objetivos de producción, ciclos, y necesidades del cultivo específico.

Conocer la PAR disponible en el interior de un invernadero es información de interés para agrónomos y productores, debido a la gran influencia de esta magnitud en el rendimiento del cultivo. No es común que los productores monitoreen y/o registren la PAR al interior de los invernaderos, por lo que muchas de las decisiones que toman sobre sus cultivos se basan en la experiencia previa, repitiendo acciones frente a hechos semejantes. Si bien la experiencia es valiosa para mejorar el manejo de los cultivos, la incertidumbre y variabilidad en rendimiento que conlleva es un asunto de preocupación. Para los productores de menores recursos económicos (pequeños productores familiares), la sostenibilidad de sus sistemas pasa indudablemente por aumentar sus ingresos a través de aumentos en los rendimientos y en la eficiencia con que utilizan los escasos recursos que disponen. Se entiende entonces que son varios los motivos de interés para contar con modelos que permitan estimar la PAR transmitida por las coberturas, reduciendo de esta forma riesgos e incertidumbres.

Existen varios estudios de transmitancia en invernaderos en la literatura. En Giacomelli et al. (1988) se investigó la transmitancia global PAR y de banda ancha (GHI) en un invernadero de tipo arco con doble cubierta de polietileno trabajando a nivel de promedios horarios. Reportan transmitancias similares para PAR y para banda ancha y dan un modelo que las vincula. En Iglesias y Muñoz (2007) se compara la transmitancia de la radiación PAR en distintos tipos de invernaderos con techos curvos y planos (capilla y semi parabólico), cubiertos con el mismo tipo de film semitransparente. Se concentran en la incidencia de la inclinación del techo en la transmitancia PAR sobre un plano horizontal realizando medidas puntuales al mediodía solar. No encuentran diferencias significativas de transmitancia por la forma del techo y determinan una reducción de 17 % en transmitancia al usar doble cobertura. En Kittas et al. (1999); Kittas y Baille (1998) se mide la transmitancia espectral a mediodía solar en el rango de 400 a 1100 nm para diversos films empleadas en invernaderos. En Aldaftari et al. (2019) se estudia espectralmente el uso de coberturas con películas difusoras y atenuadoras (tintadas) con el objetivo de bajar la temperatura en el interior, manteniendo los niveles de fotosíntesis.

En este trabajo se realiza el modelado de la transmitancia global PAR para varios films usados como cobertura semitransparente, en particular analizando su variación con el ángulo de incidencia de la irradiancia solar sobre la superficie. La transmitancia solar hemisférica o global ($\tau_{g\lambda}$) de un material es el cociente entre la irradiancia solar global transmitida e incidente. Esta magnitud depende de las propiedades ópticas del material, de la longitud de onda, y del ángulo de incidencia de la irradiancia solar. Al ser considerada en una porción del espectro con un determinado ancho espectral, la dependencia con la longitud de onda se elimina, representando por tanto el comportamiento promedio dentro la porción considerada. La transmitancia PAR de una cobertura puede ser considerada como cociente de irradiancia o del flujo fotónico. Estos cocientes no son exactamente iguales debido a la selectividad espectral de la transmisividad de la cobertura. Debido al uso agropecuario, en este trabajo interesa modelar la transmitancia PAR para flujo fotónico, es decir,

$$\tau_p = \frac{Q_{pt}}{Q_{pi}}, \quad (1)$$

donde Q_p expresa el flujo de fotones PAR en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, y t e i denotan a los flujos transmitido e incidente, respectivamente. Esta cantidad se mide empleando sensores cuánticos de uso extendido para la medida de radiación solar con fines agropecuarios. Más información sobre la conversión de la PAR de irradiancia a flujo fotónico (de unidades radiométricas a unidades cuánticas) pueden consultarse en Akitsu et al. (2015) y Di-Laccio et al. (2023).

En el presente en toda condición de nubosidad, como fuente de luz sobre la cobertura sin cultivo, montada sobre un marco horizontal sin cultivo. Esto permite dejar de lado los efectos de evapotranspiración de cultivos, rocío matinal, lluvias, suciedad acumulada, entre otros, prevaleciendo el efecto del film^s. Se ajusta y evalúa el desempeño a escala minutil de un modelo fenomenológico de τ_p para cuatro coberturas de invernaderos nuevas que habitualmente consiguen en plaza los productores del litoral norte de Uruguay. Adicionalmente, se estudia el cambio en la transmitancia por el envejecimiento de dos coberturas de recambio, luego de 3 años de uso en un invernadero. Para esto, se comparan las transmitancias de una

misma marca y modelo, al considerarse en su estado nuevo y de recambio, luego de ser utilizados en techos norte y sur de un invernadero productivo real.

MODELOS

Los modelos físicos o empíricos para la transmitancia solar global de una cubierta transparente, por lo general, requieren la medida de la radiación solar directa (G_b) y difusa en plano horizontal (G_d). Estas medidas son específicas de laboratorios de investigación, puesto que requieren de un seguimiento y mantenimiento regular de los equipos (seguimiento solar de precisión y esfera de sombreado). A nivel de campañas de medición las variables registradas habitualmente son las meteorológicas clásicas y la radiación solar global en plano horizontal (G_h), y en algunos casos se mide también la PAR en plano horizontal (Q_p). En caso de modelar τ_p a partir de modelos dependientes de G_b y G_d , se tendrá la dificultad planteada sobre la disponibilidad de estas medidas en campo. Evitando esta dificultad, en este trabajo se considera un modelo empírico simple que requiere solamente el cálculo del ángulo de incidencia de la radiación solar directa (θ), además de la medida de la Q_p exterior para estimar la Q_p interior a través del τ_p modelado.

El modelo propuesto por Schultz y Svendsen (1998), Ec. (2), está pensado para determinar la transmitancia global de una cubierta vidriada en todo el ancho de banda del espectro solar. Este modelo empírico es a-priori adecuado para describir la transmitancia de cualquier cubierta semitransparente plana. En este trabajo se demuestra que el modelo puede describir bien la tendencia de los datos de transmitancia PAR para varias coberturas de invernaderos.

$$\tau_{p1} = \tau_{np} [1 - \tan^p(\theta/2)] \quad (2)$$

El modelo, que denominaremos SSM, tiene una dependencia angular con respecto al haz de luz directo y dos parámetros ajustables: (i) la transmitancia en incidencia normal τ_{np} , y (ii) el parámetro p asociado al coeficiente de extinción del material.

Por otro lado, se toma como referencia la utilización de un valor constante para modelar esta transmitancia (Ec. (3)), dado que es una opción usual. Esta idea puede utilizarse para cálculos rápidos y aproximados, teniendo mejor resultado en ciertas condiciones cielo y de altura solar (α_s). Se espera que la incertidumbre de este método, denominado aquí CTE, sea mayor.

$$\tau_{p2} = \text{constante} \quad (3)$$

EQUIPOS Y MÉTODO EXPERIMENTAL

Las medidas fueron realizadas en el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Universidad de la República, en su estación experimental de Salto, Uruguay, denominada LE (-31.28°, -57.92°, 56 m snm). Se realizaron medidas en plano horizontal de la PAR transmitida e incidente, Q_{pt} y Q_{pi} de forma simultánea y para una cobertura a la vez. Las mediciones se tomaron en forma continua y a escala minutal durante dos semanas para cada muestra. Se ensayaron ocho coberturas, cuatro nuevas de diferentes marcas y cuatro de recambio (con 3 años de uso) de dos invernaderos del tipo capilla en operación, correspondientes a la misma zona geográfica. Las coberturas de recambio son de techos orientados al norte (N) y al sur (S). En la Tabla 1 se resumen las etiquetas asignadas a cada cobertura y sus principales características relacionadas con la investigación. En particular, se debe destacar que la notación utilizada para cada cobertura está en relación con su espesor, en μm .

Para el registro de las medidas se construyó el dispositivo experimental de la Fig. 1, que consiste en un aro metálico de color gris opaco de 28 cm de diámetro sujetado a la mesa mediante tornillos. En la parte interior del aro se coloca un sensor cuántico y encima se coloca la cobertura seleccionada, la cual es sujeta por precintos de plástico. Fuera del recinto se ubica otro sensor cuántico para la medida exterior. Los dos sensores cuánticos utilizados son del modelo LI-190R, que constan de un difusor (disco

Tabla 1: Etiqueta y características de cada cobertura.

Cobertura	Espesor (μm)	Estado	Caída del techo
TT150	150	Nueva	-
TT120	120	Nueva	-
AC150	150	Nueva	-
AG150	150	Nueva	-
TT150N	150	de recambio	Norte
TT150S	150	de recambio	Sur
AG150N	150	de recambio	Norte
AG150S	150	de recambio	Sur

de acrílico plano), un filtro para la región espectral PAR, y un fotodiodo de Silicio. Ambos medidores tienen calibración de fábrica vigente con una incertidumbre de $\pm 5\%$ (LI-COR, 2023), y previo al inicio de la recolección de medidas fueron intercomparados y ajustados finamente entre sí para minimizar las diferencias en el registro de mediciones absolutas entre ambos. Se incluyen además medidas de irradiancia global en plano horizontal, G_h , para el control de calidad de las muestras y la selección de datos en condiciones de cielo claro. Las medidas se registran a escala minuter, con relojes sincronizados, y cada dato es el promedio de medidas instantáneas tomadas cada 10s dentro del minuto. El registro de G_h es mediante un piranómetro de la marca Kipp & Zonen, modelo CMP10 (Clase A con respuesta espectral plana según la norma ISO 9060:2018) equipado con unidades de ventilación y calefacción CVF4 para evitar la acumulación de polvo y gotas de agua en sus cúpulas. Este cuenta con calibración vigente, y ha sido calibrado contra un piranómetro de referencia Kipp & Zonen CMP22 que tiene trazabilidad a la referencia radiométrica mundial en Davos, Suiza. Estas medidas, conjuntamente con cálculos de geometría solar, permiten la evaluación de los modelos para la transmitancia global PAR en plano horizontal.



Figura 1: *Ilustración del dispositivo experimental.* Sobre una mesa de medidas se sujeta un aro el cual contiene en su interior un medidor PAR y en la cara superior se sujeta la cobertura. A 2.5 m del aro se ubica el sensor PAR externo.

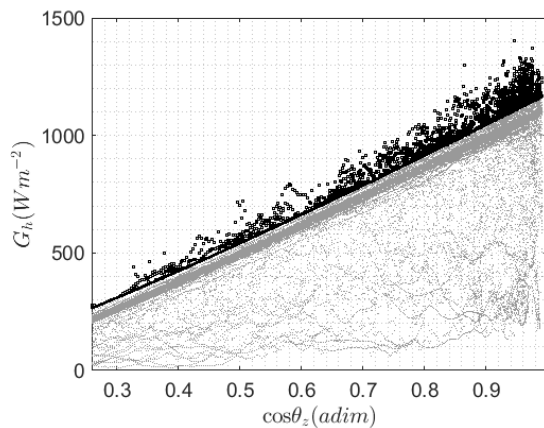
El control de calidad de los datos se realiza a escala minutal y a partir de las medidas de G_h y Q_p . Primero se realiza una inspección visual donde se excluyen días de precipitaciones debido a la acumulación de agua sobre la cubierta, así como datos notoriamente anómalos. Al conjunto de datos diurnos que pasa la inspección visual, se le aplican filtros automáticos secuenciales.

Los filtros de calidad aplicados son: F1, selecciona muestras con altura solar mayor a 15° (este filtro elimina los datos afectados por las paredes del aro metálico); F2, límites sobre G_h fundamentados en los filtros de la BSRN (Baseline Solar Radiation Network, <https://bsrn.awi.de/>), cuyos coeficientes fueron ajustados localmente (McArthur, 2005)); F3, límites superior e inferior para Q_{pi} , fijados por inspección visual (Foyo-Moreno et al., 2017; Di-Laccio et al., 2021)); F4, límites para la fracción PAR definida como el cociente $f_p = Q_{pi}/G_h$, donde el límite inferior se determina con el cociente de las constantes solares PAR y de banda ancha a nivel tope de la atmósfera (Di-Laccio et al., 2022)), $Q_{sp} = 2413 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y $G_s = 1361 \text{ W}/\text{m}^2$, incluyendo una estimación de su incertidumbre, y el límite superior se determina por inspección visual; F5, es el límite físico para la transmitancia global PAR, considerando un máximo de 7 % de error experimental, levemente por encima de la incertidumbre de 5 % de las medidas de Q_p que se utilizan para su cálculo.

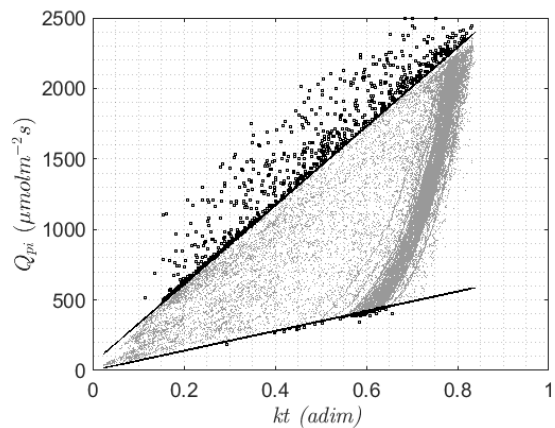
Tabla 2: Resumen del control de calidad de las medidas.

Filtro	Condición	Datos	% Descarte
Diurnos	$\cos \theta_z > 0$	39659	-
F1	$\cos \theta_z > 0.2588$ (equiv. a $\alpha_s > 15^\circ$)	33585	15.3
F2	$0 < G_h < G_{sc} (0.85) \cos^{(1.15)} \theta_z + 20 \text{ W}/\text{m}^2$	31559	5.1
F3	$\alpha_{min} kt < Q_{pi} < \alpha_{max} kt + c^*$	30618	2.3
F4	$1.7 \text{ J}/\text{mol} < f_p < 10 \text{ J}/\text{mol}$	30297	0.8
F5	$0 < \tau_{pg} < 1.07$	30193	0.3
Total		30193	23.9

* α_{min} , α_{max} y c se fijan por inspección visual.



(a) Control de calidad en G_h .



(b) Control de calidad en Q_{pi} .

Figura 2: (a) Filtrado de la radiación global incidente (G_h) y su dependencia con el coseno del ángulo cenital (θ_z). (b) Filtrado de la radiación PAR incidente (Q_{pi}) y su dependencia con el índice de claridad (k_t). Se identifican con puntos grises los datos que pasan el control de calidad y con cuadrados negros los datos excluidos.

En la Tabla 2 se presenta un resumen que indica la etiqueta del filtro utilizado, la condición exigida, el número de datos que pasan el filtrado, y el porcentaje de descarte del proceso (este porcentaje es calculado respecto a los datos diurnos iniciales). En la Fig. 2a se presenta el filtrado de G_h y de Q_{pi} . En color gris se muestran los datos que pasan los filtros y en negro los descartados. Los datos obtenidos se agrupan por cobertura, es decir, se conforman ocho conjuntos de datos, cuatro de coberturas nuevas y cuatro de recambio (dos de orientación norte y dos del sur). A su vez, dentro de cada conjunto particular, se identifica el subconjunto de muestras correspondientes a cielo claro, utilizando el algoritmo de Reno y Hansen (2016) disponible en la biblioteca de código abierto PVLIB. Este algoritmo se aplica a escala minutal sobre G_h con una ventana móvil de 30 minutos. En la Tabla 3 se especifica la cantidad total de datos disponibles y del subconjunto de datos de cielo claro en cada caso, indicando además el porcentaje de muestras de cielo claro en el periodo en que se ensayó cada cobertura.

Los modelos de las Ecs. (2) y (3) se entrenan y evalúan para cada cobertura considerando las muestras de cielo claro y para toda condición de cielo (cielo claro + cielo cubierto + cielo parcialmente cubierto) que pasan los controles de calidad. Para la determinación de parámetros τ_{np} y p del modelo SSM se realizó un ajuste no lineal de optimización contra los datos experimentales. La obtención del valor para el modelo CTE se hizo mediante un ajuste lineal de los datos en el espacio (Q_{pt}, Q_{pi}) con intercepto nulo. El entrenamiento y la evaluación de los modelos se realizó utilizando un muestreo aleatorio estándar y el método de validación cruzada. En cada iteración, el 50 % de los datos se utilizó para el entrenamiento del modelo y el otro 50 % se utilizó para validación. Después de 1000 iteraciones, los coeficientes y el indicador de desempeño son promediados y reportados, lo que asegura repetitividad del procedimiento de ajuste/validación. En todos los ajustes de parámetros se verificó que el estadístico t fuese mayor a 3, lo que asegura significancia estadística en la estimación. En particular, y dada la gran cantidad de puntos experimentales de la Tabla 3, el mínimo valor de t fue de $\simeq 90$, obtenido para el parámetro p del modelo SSM. Como indicador de desempeño se utiliza el error cuadrático medio relativo a la media de las medidas (rRMSD) dado por la Ec. (4),

$$\text{rRMSD} (\%) = \frac{100}{\bar{\tau}_p^{exp}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\tau_p^{est}(i) - \tau_p^{exp}(i)]^2}, \quad (4)$$

donde τ_p^{est} y τ_p^{exp} son la transmitancia global PAR estimada por los modelos y experimental, respectivamente, y $\bar{\tau}_p^{exp}$ denota el promedio de las mediciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En acuerdo con los objetivos del trabajo, los resultados se agrupan en dos secciones. La primera busca responder ¿Qué desempeño se obtiene con los modelos de transmitancia global PAR para las coberturas nuevas?, y ¿qué ganancia de desempeño tiene el modelo de la Ec. (2) respecto al uso de un valor constante? La segunda sección se centra en responder ¿Qué cambios se producen en la transmitancia global PAR por la exposición de una cubierta en un invernadero productivo por un periodo de tres años? ¿Existe alguna diferencia de degradación entre una cubierta orientada al norte y otra orientada al sur?

Modelos de transmitancia PAR

Los parámetros obtenidos y el rRMSD asociados a cada modelo y cada cobertura (en estado nuevo) se presentan en la Tabla 4, para todo tipo de cielo y para condiciones de cielo claro. La Fig. 3 muestra los datos experimentales junto con el ajuste de ambos modelos para el film TT150 en toda condición de cielo. El comportamiento que se muestra es similar al de las otras coberturas analizadas. Fenomenológicamente se observa que el modelo SSM describe mejor las condiciones de cielo despejado (acumulación de puntos con regularidad en la Fig. 3), mientras que el valor constante tiende a describir mejor las condiciones nubladas (donde τ_p no muestra direccionalidad con θ). Esto se observa cuantitativamente en los indicadores del modelo SSM, para el cual se tiene un rRMSD menor al 3 % para las muestras de cielo despejado y un aumento a 4.5-6.5 % para toda condición de cielo. En cambio, el desempeño del valor constante (modelo CTE) no está notoriamente afectado por la diferencia de conjuntos, tendiendo a mejorar un poco para

Tabla 3: Codificación de cada cobertura. Se indican las muestras disponibles, la cantidad correspondiente a cielo claro, y el porcentaje que representan éstas del total.

Material (cobertura)	Datos disponibles	Cielo claro (CC)	% CC
TT150	3327	1889	56.7
TT120	4980	3144	63.1
AC150	4401	2160	49.1
AG150	3811	2713	71.1
Coberturas de recambio			
TT150N	3562	2034	57.1
TT150S	3256	2096	64.4
AG150N	3301	1341	40.6
AG150S	3555	1638	46.1

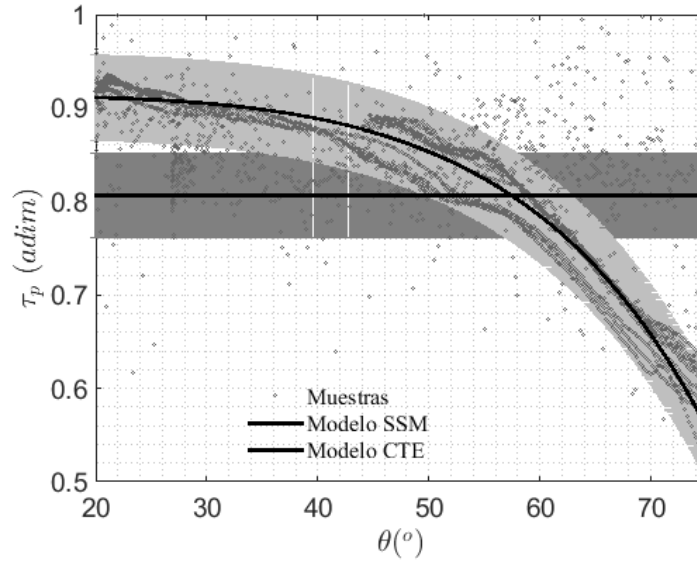


Figura 3: Ambos modelos contra datos experimentales para el TT150. Las bandas de sombreado, para SSM y CTE, representa la desviación estándar (≈ 0.09) de τ_p .

toda condición de cielo (el rRMSD va de 8 % a 11 % en cielo claro y de 7 % a 12.3 % en toda condición). En cualquier caso, el modelo SSM provee una mejor representación que el modelo CTE, incluso en toda condición de cielo, como muestran los indicadores. La ganancia de desempeño es, no obstante, mayor para las condiciones de cielo despejado.

El valor promedio de τ_p varía entre 0.78 y 0.84 para las cuatro coberturas (ver los valores del modelo CTE), y es menor en todos los casos al correspondiente τ_{np} , lo que es un comportamiento esperado. Es interesante notar que los valores de τ_p promedio obtenidos son muy similares en ambos conjuntos de datos. Esto se debe al comportamiento de τ_p ante condiciones de cielo claro, decreciente fuertemente con θ e iniciando en un valor alto, y ante condiciones de cielo nublado, donde no hay direccionalidad, pero se mantiene en un valor alto-intermedio, lo que conduce a valores promedio similares entre sí.

Tabla 4: Análisis para las coberturas nuevas.

Cobertura	Modelo SSM			Modelo CTE	
	τ_{np}	p	rRMSD	τ_{p2}	rRMSD
Todas las muestras					
TT150	0.89	4.2	6.3	0.83	11.0
TT120	0.85	4.6	6.2	0.82	8.4
AC150	0.82	4.4	6.5	0.78	10.0
AG150	0.88	4.8	4.5	0.84	8.0
Cielo Claro					
TT150	0.91	3.6	2.5	0.81	12.3
TT120	0.86	4.4	2.2	0.82	7.0
AC150	0.83	4.0	2.8	0.78	8.8
AG150	0.89	4.3	2.7	0.84	8.7

A partir del análisis anterior, nos enfocamos en lo que sigue en los resultados para la condición de cielo despejado. Cabe mencionar que esta es la condición de cielo en donde la recolección de energía PAR por parte de los cultivos es mayor. La Fig. 4 muestra el ajuste de los modelos a los datos experimentales de cielo claro, donde se observa la adecuación de la Ec. (2) al modelado de τ_p en estas condiciones. Para todas las coberturas estudiadas se observa que la transmitancia global PAR en incidencia normal, ajustada numéricamente para esta condición de cielo, está entre 0.83 y 0.91, lo que son valores elevados y esperados para coberturas de este tipo. Tanto τ_{np} como p presentan variaciones con la marca y modelo, pero también con el espesor, en forma no evidente. En particular, es de notar que se obtiene un valor de τ_{np} mayor para el modelo TT150 que para el modelo TT120, lo cual no es esperado a priori debido al espesor de cada uno. El valor estimado por el modelo es consistente con los datos experimentales de la Fig. 4. Esto podría deberse a diferencias en el proceso de producción de estos films, lo que agregaría otra dimensión para el análisis.

En la Fig. 5 se resumen los gráficos del modelo SSM en condiciones de cielo claro para cada cobertura. Allí se aprecian los diferentes comportamientos de τ_p en cielo despejado. Se observa que la cobertura TT150, de mayor espesor y transmitancia en incidencia normal estimada que la cobertura TT120, cae más rápidamente a partir de un ángulo de incidencia de 40° aproximadamente. En cambio, la cobertura TT120 presenta una transmitancia más uniforme hasta ángulos próximos a los 55° . El punto de cruce de ambas transmitancias se encuentra aproximadamente en $\theta \simeq 58^\circ$.

Envejecimiento de cubiertas para invernaderos

Las coberturas de invernaderos luego de estar algún tiempo expuestas a condiciones climáticas de intemperie (2 o 3 años) a simple vista se ven más opacas a la luz visible respecto a las coberturas nuevas. Sin embargo, el efecto sobre la transmitancia PAR no es tan acentuado como podría concluirse de esta observación cualitativa. En la gráfica de la Fig. 6 se muestra el comportamiento angular de τ_p para films nuevos y usados (luego de estar expuesto a condiciones de campo por 3 años) para las coberturas TT150 y AG150. Los subíndices N y S refieren respectivamente a las inclinaciones norte y sur de los techos de los invernaderos con tipología de capilla. En la Tabla 5 se muestran los parámetros de ajuste del modelo SSM en condiciones de cielo despejado para las coberturas de recambio, el rRMSD resultante, y la variación relativa de cada parámetro respecto al mismo film nuevo. Se aprecia que la transmitancia PAR en incidencia normal disminuye en un 9-12 %. Se observa un efecto asociado a la orientación de la

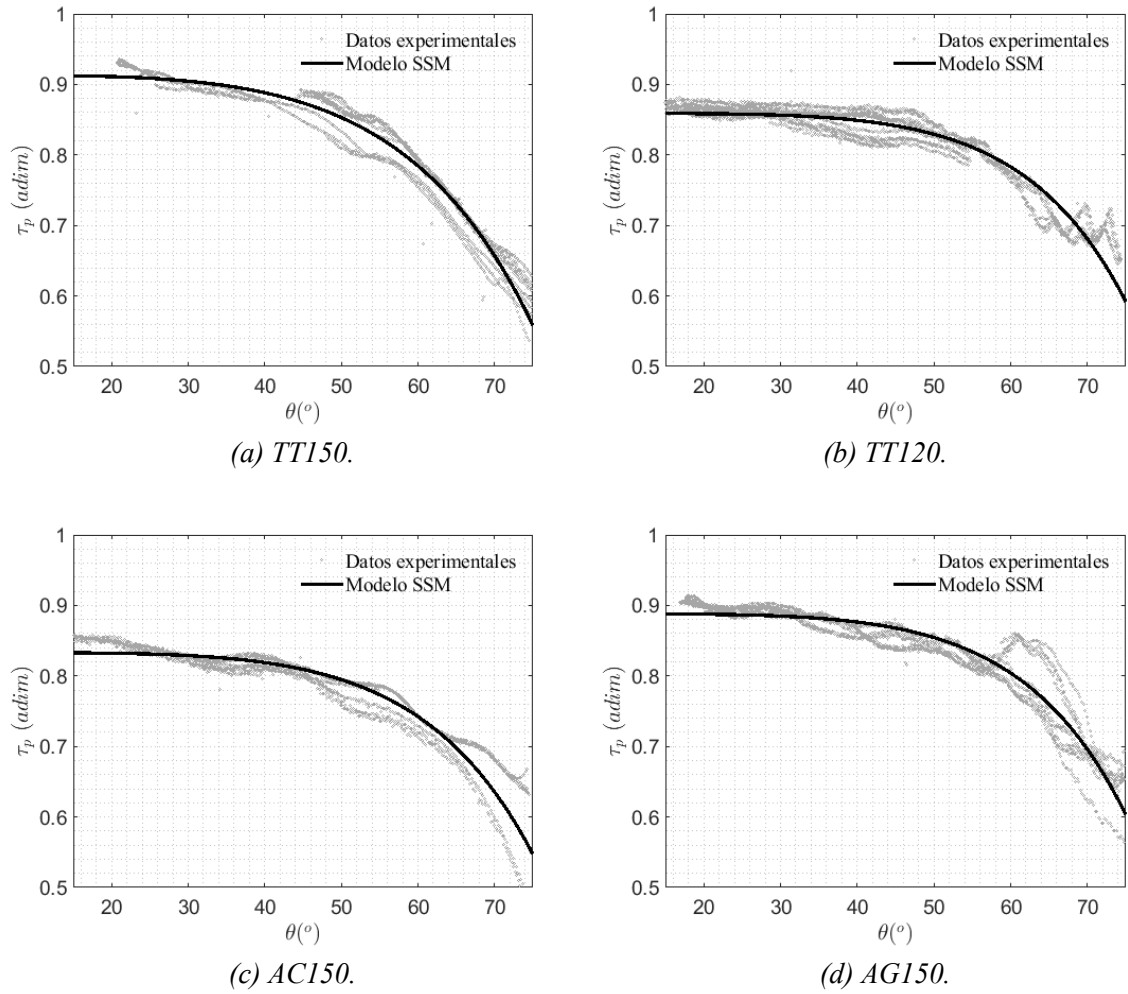


Figura 4: Ajuste del modelo SSM para cada cobertura en condiciones de cielo claro.

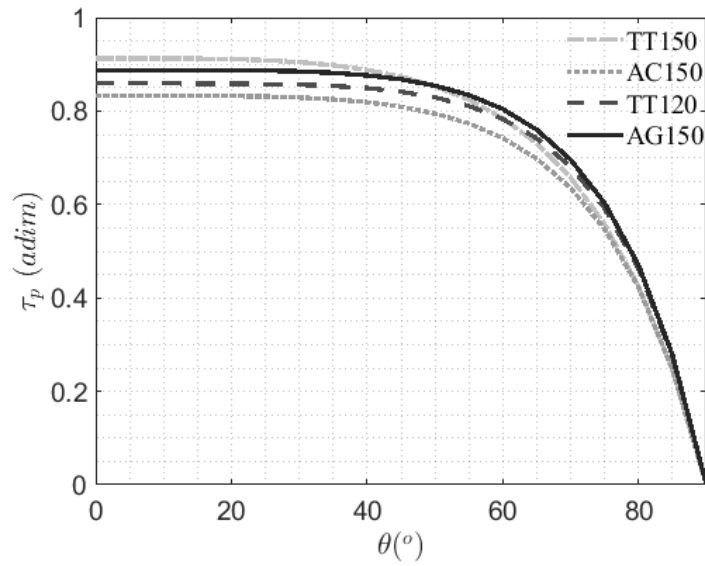


Figura 5: Modelo SSM para las cuatro coberturas nuevas, ajustado en condiciones de cielo claro.

cobertura respecto al movimiento aparente del Sol, dado que los films que se orientan al norte presentan una disminución de τ_{np} levemente mayor que los orientados al sur (del 2 % aproximadamente). Por otro

lado, el cambio en el parámetro p asociado al comportamiento angular del material, al parecer, varía con la marca de la cobertura. Para el TT150 se podría decir que el comportamiento angular es casi invariante con el tiempo, mientras que el AG150 presenta una variación próxima al 10 % en el parámetro p . Esto quiere decir que la transmitancia PAR de coberturas envejecidas cae más rápido angularmente que la transmitancia PAR de la misma cobertura pero sin uso. Para el modelo CTE (τ_p promedio) se aprecia una disminución del 7.2 y 6.6 % para el TT150 al norte y sur respectivamente, y de 13.2 y 10.1 % para el AG150. Se observa también para este modelo un mayor cambio de la cobertura AG150 y la diferencia antes mencionada entre la orientación norte y sur.

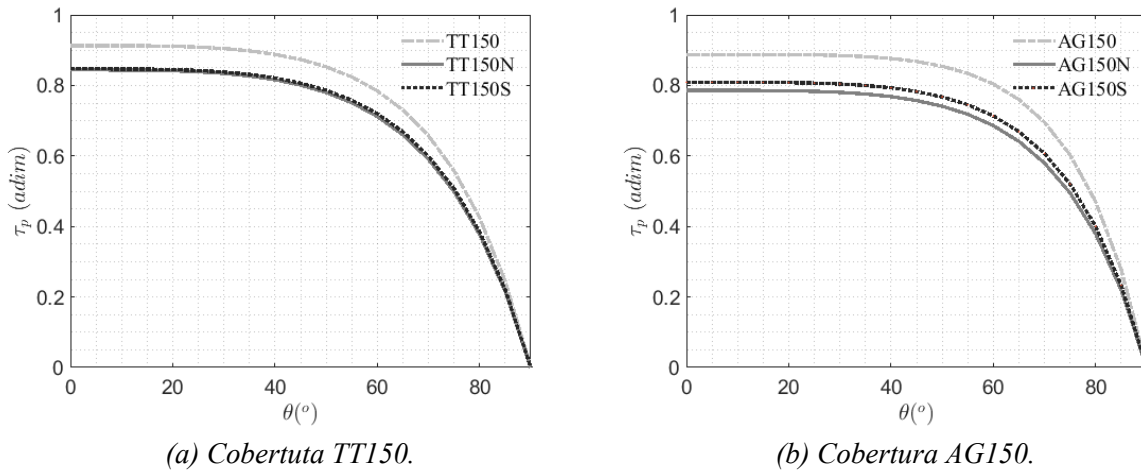


Figura 6: Comparación entre coberturas nuevas y usadas modeladas en condiciones de cielo claro.

Tabla 5: Ajuste y validación del modelo SSM para coberturas usadas en condiciones de cielo claro. Variación relativa de los parámetros entre las coberturas nuevas y con 3 años de uso.

Cobertura	τ_{np}	p	rRMSD	$\Delta\tau_{np}$ (%)	Δp (%)
TT150N	0.84	3.4	3.4	-11.6	-2.5
TT150S	0.85	3.5	1.6	-9.3	-2.8
AG150N	0.79	3.8	4.3	-11.2	-11.6
AG150S	0.81	3.9	3.0	-9.0	-9.3

CONCLUSIONES

En este trabajo se reporta el análisis del comportamiento de la transmitancia global PAR para ocho tipos de coberturas transparentes utilizadas como envolvente en invernaderos. Se parte de un ensayo experimental a Sol real y en condiciones controladas, donde destaca el cuidado por evitar la acumulación de agua sobre las cubiertas por condensación o precipitaciones, y por eliminar las arrugas que surgen debido a la dilatación térmica. Se analizan coberturas de uso típico en Uruguay para este fin, cuatro en estado nuevo y cuatro con utilización de 3 años en orientación norte y sur, con marcas y modelos coincidentes con dos de las nuevas. El trabajo demuestra que es posible aplicar la Ec. (2) para modelar la transmitancia PAR de este tipo de coberturas. Los resultados de este trabajo son un primer paso para incorporar con mayor precisión el modelado de la transmitancia PAR en invernaderos, considerando tipologías típicas.

A partir de los datos experimentales se puede apreciar que la transmitancia PAR de las cubiertas depende del fabricante, espesor, y modelo del mismo. La transmitancia global PAR promedio varía entre 0.78 y 0.84, con poca variación entre las muestras adquiridas en condiciones de cielo despejado y en toda condición de cielo. Se ajustaron y evaluaron dos modelos simples con potencial uso en la determinación

de transmitancia global PAR para ambas condiciones de cielo. El modelo SSM con dependencia angular y solo dos parámetros ajustables representa muy bien las condiciones de cielo despejado, con un rRMSD del 3 %. Su uso para toda condición de cielo aumenta el rRMSD a $\simeq 6\%$, no obstante, incluso en este caso, presenta un mejor desempeño que el modelo constante, que presenta rRMSD de 7-12.3 % para todo cielo y de 8-11 % para cielo claro. El uso en condiciones de cielo claro del modelo SSM permite estimar la transmitancia global PAR en incidencia normal, encontrándose valores entre 0.83 y 0.91, lo que es esperado para este tipo de cubiertas.

Finalmente, se evaluó el cambio en la transmitancia global PAR debido al envejecimiento de los films durante un uso de 3 años en un invernadero productivo. Aquí se apreció una disminución promedio de 9-12 % en la transmitancia en incidencia normal (parámetro τ_{np}), con un 2 % de diferencia dependiendo de si el uso de la cobertura fue orientado al norte o al sur. La disminución en esta variable fue similar para ambas marcas consideradas. En cambio, el parámetro que regula el comportamiento angular del modelo (p) presentó una variación importante con la marca, lo que es un aspecto a profundizar en trabajos futuros considerando una mayor cantidad de marcas y modelos.

Este trabajo demuestra que la utilización del modelo SSM es una mejora respecto a la utilización de un valor constante, de uso extendido en la práctica. Los resultados obtenidos, al usar como fuente la irradiancia solar real, son aplicables a la transmitancia de coberturas semitransparentes reales siempre que se ajusten los parámetros a los datos. En un invernadero real, sería necesario calcular el ángulo de incidencia solar de cada superficie semitransparente expuesta al Sol (para las que no reciben radiación directa bastaría usar un valor constante). Esto puede realizarse en forma automatizada, a partir de la ubicación, hora y orientación de la superficie (Iqbal, 1983). En Python, existen bibliotecas como PVlib (Holmgren et al., 2018) que realizan estos cálculos en forma sencilla para el usuario. En vista de lo observado en este trabajo, si se requiere un análisis preciso de un invernadero dado, se recomienda ensayar y modelar la transmitancia PAR de la cobertura empleada. La variabilidad de la transmitancia y los parámetros para cada tipo de film, entre marcas y entre diferentes partidas de una misma marca, así como el impacto de esta variabilidad en el modelado de invernaderos, son aspectos interesantes a abordar en trabajos futuros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República por el apoyo financiero a través de su programa de Grupos de I+D.

REFERENCIAS

- Akitsu, T., Kume, A., Hirose, Y., Ijima, O., y M., N. K. (2015). On the stability of radiometric ratios of photosynthetically active radiation to global solar radiation in Tsukuba, Japan. Agricultural and Forest Meteorology, 209-210:59–68.
- Aldaftari, H. A., Okajima, J., Komiya, A., y Maruyama, S. (2019). Radiative control through greenhouse covering materials using pigmented coatings. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.
- Di-Laccio, J. L., Russo, P., Monetta, A., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2023). Atmospheric dependence of the direct, diffuse, and global clear-sky conversion ratios between solar photosynthetic active irradiance and photon flux. En evaluación en el Agricultural and Forest Meteorology Journal. Preprint disponible en http://les.edu.uy/papers/preprint_PAR-ratios-modeling.pdf.
- Giacomelli, G. A., Ting, K. C., y S., P. (1988). Solar par vs. solar total radiation transmission in a greenhouse. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 31(5):1540–1543.
- Holmgren, W., Hansen, C., y Mikofski, M. (2018). Pvlb python: a python package for modeling solar energy systems. Journal of Open Source Software, 3.
- Iglesias, N. y Muñoz, A. (2007). Comparación de la transmisión de la radiación fotosintéticamente activa (par) en invernaderos. Horticultura Argentina, 60(26):10–16.

- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press.
- Kittas, C. y Baille, A. (1998). Determination of the spectral properties of several greenhouse cover materials and evaluation of specific parameters related to plant response. Journal of Agricultural Engineering Research, 71(2):193–202.
- Kittas, C., Baille, A., y Giaglaras, P. (1999). Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. Journal of Agricultural Engineering Research, 73(4):341–351.
- LI-COR (2023). LI-COR. Support: LI-190R and LI-191R Quantum Sensors. Dirección URL: <<https://www.licor.com/env/support/LI-190R-and-LI-191R/topics/quantum-performance.html#LI-190R>> [consulta: 16 de enero de 2023].
- Reno, M. J. y Hansen, C. W. (2016). Identification of periods of clear sky irradiance in time series of ghi measurements. Renewable Energy, 90:520–531.
- Schultz, J. M. y Svendsen, S. (1998). Winsim: A simple simulation program for evaluating the influence of windows on heating demand and risk of overheating. Solar Energy, 63(4):251–258.

GLOBAL PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE TRANSMITTANCE MODELING OF MATERIALS EMPLOYED FOR GREENHOUSES IN URUGUAY

ABSTRACT: This work studies the photosynthetically active solar radiation (PAR) global transmittance of different coverings (films) used in greenhouses. Four coverings in their factory state and four coverings with a three-year utilization are included. These latter films were used in a real greenhouse with northern and southern orientation. Two of the new films are of the same brand and model as those that were used. An empirical model commonly used for broadband global transmittance for other surfaces is adapted to global PAR transmittance. This model uses as input the angle of incidence (θ) of the direct beam to the surface and has two adjustable parameters (τ_{np} and p). The use of a constant transmittance is also included as a reference. It is observed that the adapted model performs better than the constant value for all sky conditions and clear skies, reproducing the clear-sky global PAR transmittance with very low uncertainty. The three-year films' transmittance degradation is evaluated at 9-12 %, with a 2 % downgrade difference between their utilization with northern or southern orientation.

Keywords: PAR transmittance, greenhouse covers, coverage degradation, PAR transmittance models.