

EVALUACIÓN DE DIFERENTES MODELOS UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN PLANOS INCLINADOS

M.J. Denegri, C. Raichijk, H. Grossi Gallegos
GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján,
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@mail.unlu.edu.ar

Recibido: 30/07/12; Aceptado: 02/10/12

RESUMEN: Nueve modelos de estimación de la radiación solar global incidente en un plano inclinado fueron utilizados para determinar cuánta radiación fotosintéticamente activa puede ser recibida en superficies inclinadas 30°, 45°, 60° y 90° respecto de la horizontal y orientadas al norte. Los resultados fueron validados contra mediciones realizadas durante tres meses en Luján mediante los estimadores estadísticos RMSE%, MBE%, el coeficiente de determinación, R^2 , el estadístico- t , el puntaje de precisión, AS , y el índice de concordancia, d . Los modelos tienden a subestimar la radiación recibida en los planos inclinados a 30°, 45° y 60° y a sobreestimar la radiación incidente en el plano vertical. Analizando todos los criterios de validación, los modelos anisotrópicos presentan un desempeño mejor que el de los modelos isotrópicos, pero no hay un único modelo que se destaque del conjunto para ser el mejor estimador de la radiación incidente en los cuatro planos considerados.

Palabras clave: Modelos, plano inclinado, radiación fotosintéticamente activa

INTRODUCCIÓN

Contar con información precisa sobre la radiación solar global fotosintéticamente activa, PAR, incidente sobre la superficie terrestre es importante para el modelado de los sistemas agrícolas y ecológicos. Conocer el comportamiento de la componente fotosintética de la radiación solar tanto en plano horizontal como en superficies inclinadas permitirá mejorar los modelos que representan la fisiología de los cultivos y la precisión de los pronósticos de rendimiento que tengan a la componente fotosintética (o alguna variable derivada de ella) como dato de entrada.

El objetivo de este trabajo es analizar la capacidad de nueve modelos diferentes para estimar los valores diarios de radiación fotosintéticamente activa que llega a un plano inclinado. Si bien los modelos que emplearemos en el análisis han sido desarrollados para la radiación solar global, si tenemos en cuenta que en plano horizontal la relación entre la componente fotosintética y la radiación global se mantiene aproximadamente constante (Denegri, 2011), los modelos podrían funcionar también para estimar la radiación fotosintéticamente activa en planos inclinados. Este sería un dato importante, por ejemplo, para aquellos que trabajen con modelos de crecimiento de cultivos o del ciclo de carbono, ya que las hojas en las diferentes coberturas vegetales se encuentran en su mayoría inclinadas y no de manera horizontal, por lo que si se utilizara la energía que se está recibiendo en un plano horizontal, se podrían estar subestimando los resultados en algunas condiciones y sobreestimando en otras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos experimentales

Los datos utilizados para llevar a cabo este trabajo fueron obtenidos en la estación Solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján (34° 35' S, 59°03' W, 20 msnm). Durante el período comprendido entre el 29 de septiembre y el 19 de diciembre de 2010 se realizaron simultáneamente mediciones de radiación global fotosintéticamente activa en planos inclinados a 30° (Q_{30}), 45° (Q_{45}), 60° (Q_{60}) y 90° (Q_{90}), orientados hacia el norte. Los sensores utilizados fueron desarrollados por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Estos equipos, conectados a un sistema automático de adquisición de datos Campbell CR1000, fueron interrogados una vez por segundo y esos valores integrados cada diez minutos. Las mediciones en plano horizontal se realizaron con un sensor PAR-Lite de la firma Kipp & Zonen, conectado a una CR10X también de Campbell e interrogado de la misma manera. Con los valores integrados cada diez minutos fueron calculadas las integrales diarias.

Modelos para la estimación de la radiación solar en planos inclinados

Los modelos utilizados en este trabajo para determinar la componente fotosintéticamente activa fueron desarrollados originalmente para estimar la radiación solar global incidente en planos inclinados. Todos consideran que la radiación solar que llega a un plano inclinado (Q_{β} , ecuación 1) está compuesta por tres flujos: radiación directa ($Q_{\beta,b}$), radiación difusa de cielo ($Q_{\beta,d}$) y radiación reflejada difusamente por el suelo ($Q_{\beta,r}$).

$$Q_{\beta} = Q_{\beta,b} + Q_{\beta,d} + Q_{\beta,r} \quad (1)$$

siendo $Q_{\beta b}$, $Q_{\beta d}$ y $Q_{\beta r}$ dependientes de la radiación fotosintéticamente activa directa (Q_b), difusa (Q_d) y global (Q) incidente en el plano horizontal, respectivamente (ecuaciones 2 a 4).

$$Q_{\beta b} = R_b Q_b \quad (2)$$

$$Q_{\beta d} = R_d Q_d \quad (3)$$

$$Q_{\beta r} = R_r Q \quad (4)$$

donde R_b , R_d y R_r son el cociente de la radiación incidente en una superficie inclinada respecto a una superficie horizontal para las componentes directa, difusa y reflejada, respectivamente. Entonces la ecuación (1) puede escribirse como se muestra en la ecuación (5):

$$Q_{\beta} = R_b Q_b + R_d Q_d + R_r Q \quad (5)$$

La radiación reflejada difusamente por el suelo ($Q_{\beta r}$) está caracterizada por la reflectancia o albedo (ρ) del suelo: por lo tanto R_r puede ser calculado como función del albedo y de la inclinación del plano (ecuación 6):

$$R_r = \rho \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (6)$$

Tal como fue mencionado más arriba, R_b es un factor geométrico que da cuenta de la relación existente entre la radiación directa recibida en el plano inclinado con respecto al horizontal y es función de los ángulos característicos del plano, como es expresado en la ecuación (7):

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \operatorname{sen} \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \operatorname{sen}(\phi - \beta) \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta} \quad (7)$$

donde ω'_s (ecuación 8) es el ángulo horario de salida del Sol que ve el plano, determinado como el menor de los ángulos horarios correspondientes al plano horizontal, ω_s , y al plano inclinado:

$$\omega'_s = \min \begin{cases} \operatorname{arc} \cos [-\operatorname{tg}(\phi - \beta) \operatorname{tg} \delta] \\ \omega_s = \operatorname{arc} \cos [-\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta] \end{cases} \quad (8)$$

Para estimar el cociente entre la radiación solar difusa en un plano inclinado respecto a un plano horizontal (R_d), en la bibliografía se encuentran diferentes modelos. Algunos asumen que la intensidad de la radiación difusa de cielo es uniforme independientemente del sector de cielo del cual provenga, denominados modelos isotrópicos (Badescu, 2002; Tian y otros, 2001; Koronakis, 1986; Steven y Unsworth, 1986; Lui y Jordan, 1963). Otros proponen que la radiación difusa de cielo se puede considerar formada por dos componentes, una parte isotrópica recibida uniformemente desde la bóveda celeste y otra parte, conocida como circunsolar, resultante de la dispersión hacia delante de la radiación solar y concentrada en el cielo alrededor del sol (Hay, 1979). Otros además, consideran una tercera componente, conocida como brillo del horizonte y que es más notable en días claros (Reindl, 1990; Skartveit y Olseht, 1986; Ma e Iqbal, 1983). Estos últimos se denominan modelos anisotrópicos.

Las expresiones para calcular R_d propuestas en cada uno de los modelos utilizados en este trabajo son resumidas en la Tabla 1. Con estos modelos se estimó la radiación fotosintéticamente activa recibida en planos inclinados a 30°, 45°, 60° y 90°, para la latitud de Luján, orientados al norte y para un período coincidente con el que se registraron las mediciones, de manera de poder realizar una validación.

Modelo	Rd =	Tipo
Badescu (2002)_BA	$(3 + \cos(2\beta))/4$	Isot.
Tian (2001)_TI	$1 - \beta/180$	Isot.
Koronakis (1986)_KO	$(2 + \cos\beta)/3$	Isot.
Steven y Unsworth (1980)_SU	$0,51R_b + (1+\cos\beta)/2 - (1,74/1,26\pi) (\text{sen}\beta - (\beta \pi/180) \cos(\beta) - \pi \text{sen}^2(\beta/2))$	Isot.
Liu y Jordan (1961)_LJ	$(1 + \cos\beta)/2$	Isot.
Reindl y otros (1990)_RE	$(Q_b/Q_0) R_b + (1 - Q_b/Q_0) ((1+\cos\beta)/2) (1+(Q_b/Q_0)^{1/2} \text{sen}^3(\beta/2))$	Anisot.
Skartveit y Olseth (1986)_SO	$(Q_b/Q_0) R_b + \Omega \cos(\beta) + (1 - Q_b/Q_0 - \Omega) (1 + \cos\beta)/2$ $\Omega = \text{máx}[0; (0,3-2 Q_b/Q_0)]$	Anisot.
Ma-Iqbal (1983)_MI	$K_{TPAR} R_b + (1 - K_{TPAR} \cos^2(\beta/2))$	Anisot.
Hay (1979)_HD	$(Q_b/Q_0) R_b + (1 - Q_b/Q_0) (1 + \cos\beta)/2$	Anisot.

Tabla 1: Modelos evaluados en este trabajo. Isot. indica que el modelo es isotrópico y Anisot. que el modelo es anisotrópico.

PAR difusa y directa

Conocer cuánta radiación solar directa y difusa está llegando al plano horizontal es necesario para la estimación de la radiación incidente en un plano inclinado, tal como se mencionó en párrafos anteriores. Los valores de la componente PAR difusa diaria, Q_d , fueron estimados a partir de la expresión (ecuación 9) sugerida por Jacovides y otros (2010), ya que sus modelos para estimar la radiación PAR global fueron los que menor error presentaron al comparar lo estimado con lo medido en Luján (Denegri, 2011). Una vez calculada la componente difusa, se obtuvo la componente directa, Q_b , como la diferencia entre global y difusa (ecuación 11).

$$Q_d = \begin{cases} 0,968Q & \text{para } K_{TPAR} \leq 0,1 \\ Q(0,959 + 0,395 K_{TPAR} - 3,7 K_{TPAR}^2 + 2,7 K_{TPAR}^3) & \text{para } 0,1 < K_{TPAR} < 0,85 \\ 0,276Q & \text{para } K_{TPAR} \geq 0,85 \end{cases} \quad (9)$$

donde

$$K_{TPAR} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q}{\frac{24}{\pi} 3600 I_{0PAR} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360^\circ(D-2)}{365}\right) \right) \left(\cos\varphi \cos\delta \cos\omega_s + \omega_s \frac{\pi}{180^\circ} \text{sen}\varphi \text{sen}\delta \right)} \quad (10)$$

$$Q_b = Q - Q_d \quad (11)$$

Validación de los resultados

Para la validación de los resultados fueron utilizadas las integrales diarias de Q_{30} , Q_{45} , Q_{60} y Q_{90} medidas en la estación de Luján. Los valores diarios estimados ($Q_{\beta,est}$) con los nueve modelos se graficaron en función de los valores medidos ($Q_{\beta,obs}$) y luego se calcularon la pendiente y el coeficiente de determinación (R^2) a partir de un análisis de regresión lineal. Cuanto más cercano a 1 sea el valor de estos parámetros, significará una mejor concordancia entre los valores medidos y los estimados.

Además del método gráfico se utilizaron varios estimadores estadísticos, tales como el error cuadrático medio relativo, $RMSE\%$, el desvío medio relativo, $MBE\%$, la asimetría y la curtosis de los residuos ($Q_{\beta,est} - Q_{\beta,obs}$). Valores positivos de $MBE\%$ indicarán que el modelo sobreestima los valores reales, mientras que valores negativos indicarán una subestimación. Si la distribución de los residuos es normal la asimetría y la curtosis serán iguales a cero, valores positivos de curtosis indican que la distribución es puntiaguda, mientras que valores negativos indican que la distribución es dispersa, entonces el mejor modelo será el que tenga los menores valores absolutos de asimetría y los mayores valores de curtosis, ya que indicarán que los errores son sistemáticos, y por lo tanto podrían ser minimizados mediante la aplicación de alguna corrección a los modelos.

También se clasificó la habilidad predictiva relativa de los nueve modelos a partir del índice de concordancia, d , de Willmot (1981), el estadístico- t (Stone, 1993) y el puntaje de precisión, AS , propuesto por Muneer y Munawwar (2006). El mejor modelo estará asociado a los mayores valores de los índices d ($0 \leq d \leq 1$) y AS ($AS \leq 5$) y al menor valor del estadístico- t . Las expresiones utilizadas para calcularlos se listan en las ecuaciones (12) a (14):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\mathcal{Q}_{\beta_{besti}} - \mathcal{Q}_{\beta_{obsi}})^2}{\sum_{i=1}^N (|\mathcal{Q}_{\beta_{besti}} - \overline{\mathcal{Q}_{\beta_{obs}}}| - |\mathcal{Q}_{\beta_{obsi}} - \overline{\mathcal{Q}_{\beta_{obs}}}|)^2} \quad (12)$$

$$t = \left(\frac{(n-1)MBE_i^2}{RMSE_i^2 - MBE_i^2} \right)^{1/2} \quad (13)$$

$$AS = \frac{R_i^2}{R_{i,max}^2} + \left[1 - \frac{|MBE|_i}{|MBE|_{i,max}} \right] + \left[1 - \frac{RMSE_i}{RMSE_{i,max}} \right] + \left[1 - \frac{|skew|_i}{|skew|_{i,max}} \right] + \left[\frac{curtosis_i}{curtosis_{i,max}} \right] \quad (14)$$

donde el subíndice max se refiere al refiere al máximo valor encontrado del estimador para el conjunto de modelos evaluados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los distintos estimadores estadísticos obtenidos para cada modelo se presentan en las Tablas 2 a 5. A cada modelo le fue asignado un orden relativo de rendimiento en función de los valores de cada estimador y siguiendo la propuesta de Evseev y Kudish (2009) se calculó para cada modelo un orden relativo medio que permitió cuantificar la capacidad predictiva de los mismos. Estos valores se presentan en la última columna de las Tablas y surgen de promediar el orden que se le asigna a cada modelo a partir de los parámetros calculados; es decir que se arma un “ranking” por cada estimador estadístico utilizado (9 en total) y luego se promedia, para cada modelo, la ubicación asignada en cada uno de estos “rankings”, obteniendo como resultado la capacidad predictiva de cada modelo.

Pl. incl. 30° Modelo	RMSE%		MBE%		asimetría		curtosis		pendiente de la recta de ajuste		R ²		d-Willmot		estadístico-t		AS-Muneer		Orden
	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	Promedio
MI (1983)	7,0	1	-4,2	2	0,61	9	0,12	1	0,952	2	0,97	4	0,986	1	6,50	2	3,32	1	2,6
TI (2001)	7,6	2	2,0	1	0,43	4	-0,29	6	1,008	1	0,93	8	0,984	2	2,38	1	0,30	6	3,4
SO (1986)	9,0	3	-6,8	5	0,60	6	-0,05	3	0,928	5	0,97	1	0,977	3	10,39	6	1,64	3	3,9
HD (1979)	9,0	4	-6,8	4	0,61	8	-0,08	4	0,928	4	0,97	3	0,977	4	10,19	5	1,39	4	4,4
KO (1986)	9,1	5	-6,1	3	0,38	3	-0,60	7	0,935	3	0,95	7	0,976	5	7,94	3	-2,48	7	4,8
RE (1990)	9,2	6	-7,0	7	0,60	7	-0,11	5	0,926	7	0,97	2	0,976	6	10,60	7	1,10	5	5,8
LJ (1961)	9,6	7	-6,9	6	0,37	2	-0,63	8	0,927	6	0,96	6	0,973	7	9,10	4	-2,86	8	6,0
SU (1980)	17,2	9	15,6	9	0,60	5	0,10	2	1,133	9	0,88	9	0,923	9	18,65	9	1,85	2	7,0
BA (2002)	11,3	8	-9,1	8	0,37	1	-0,72	9	0,907	8	0,96	5	0,928	8	12,17	8	-3,81	9	7,1

Tabla 2: Valores de los parámetros estadísticos analizados para determinar la capacidad predictiva de los modelos. Los modelos están ordenados de mejor a peor predictor para la radiación fotosintéticamente activa en un plano inclinado a 30°.

pl. incl. 45° Modelo	RMSE%		MBE%		asimetría		curtosis		pendiente de la recta de ajuste		R ²		d-Willmot		estadístico-t		AS-Muneer		Orden
	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	Promedio
MI (1983)	6,7	1	1,7	2	0,72	9	0,03	1	1,005	1	0,94	4	0,987	1	2,36	2	3,69	1	2,4
SO (1986)	8,0	2	-4,4	5	0,63	8	-0,22	2	0,949	5	0,96	2	0,982	2	5,83	5	-5,13	2	3,7
HD (1979)	8,1	3	-4,3	4	0,61	7	-0,28	4	0,950	4	0,95	3	0,982	3	5,54	4	-7,23	4	4,0
KO (1986)	8,7	5	-1,7	1	0,26	3	-0,74	7	0,973	2	0,92	7	0,979	5	1,77	1	-23,07	7	4,2
RE (1990)	8,5	4	-5,1	6	0,59	6	-0,39	5	0,942	6	0,96	1	0,979	4	6,71	6	-11,21	5	4,8
LJ (1961)	9,2	6	-3,8	3	0,25	2	-0,80	8	0,954	3	0,92	6	0,976	6	4,02	3	-25,34	8	5,0
BA (2002)	11,5	7	-8,2	7	0,25	1	-0,96	9	0,913	7	0,94	5	0,963	7	9,03	7	-30,97	9	6,6
TI (2001)	16,5	8	13,1	8	0,30	4	-0,57	6	1,107	8	0,83	8	0,929	8	11,75	8	-17,73	6	7,1
SU (1980)	27,2	9	25,6	9	0,40	5	-0,24	3	1,222	9	0,78	9	0,837	9	24,48	9	-7,07	3	7,2

Tabla 3: Valores de los parámetros estadísticos analizados para determinar la capacidad predictiva de los modelos. Los modelos están ordenados de mejor a peor predictor para la radiación fotosintéticamente activa en un plano inclinado a 45°.

pl. incl. 60° Modelo	RMSE%		MBE%		asimetría		curtosis		pendiente de la recta de ajuste		R ²		d-Willmot		estadístico-t		AS-Muneeer		Orden
	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	Promedio
SO (1986)	8,2	1	-3,2	4	0,67	8	-0,23	2	0,960	4	0,94	2	0,981	1	3,72	4	0,13	2	3,1
HD (1979)	8,3	2	-2,9	2	0,62	7	-0,33	4	0,961	3	0,93	3	0,981	2	3,30	3	-0,99	3	3,2
LJ (1961)	10,1	4	-1,1	1	0,28	4	-0,74	7	0,976	2	0,88	6	0,971	4	0,95	1	-5,40	7	4,0
RE (1990)	9,1	3	-4,9	5	0,59	6	-0,51	5	0,942	5	0,94	1	0,977	3	5,66	5	-3,07	5	4,2
KO (1986)	10,8	5	3,1	3	0,28	3	-0,71	6	1,014	1	0,86	7	0,967	5	2,67	2	-5,09	6	4,2
MI (1983)	11,5	6	8,7	7	0,80	9	0,08	1	1,067	6	0,90	5	0,965	6	10,17	7	3,51	1	5,3
BA (2002)	12,1	7	-7,3	6	0,29	5	-0,83	9	0,919	7	0,91	4	0,959	7	6,78	6	-6,73	8	6,6
SU (1980)	42,2	9	40,6	9	0,14	1	-0,29	3	1,356	9	0,60	9	0,700	9	30,96	9	-1,66	4	6,9
TI (2001)	31,1	8	28,2	8	0,18	2	-0,79	8	1,241	8	0,64	8	0,796	8	19,20	8	-7,13	9	7,4

Tabla 4: Valores de los parámetros estadísticos analizados para determinar la capacidad predictiva de los modelos. Los modelos están ordenados de mejor a peor predictor para la radiación fotosintéticamente activa en un plano inclinado a 60°.

pl. incl. 90° Modelo	RMSE%		MBE%		asimetría		curtosis		pendiente de la recta de ajuste		R ²		d-Willmot		estadístico-t		AS-Muneeer		Orden
	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	Promedio
RE (1990)	13,0	1	6,1	1	1,23	7	4,27	2	1,046	1	0,86	2	0,960	1	4,59	1	3,91	1	1,9
SO (1986)	17,1	2	12,6	2	1,26	8	3,88	3	1,109	2	0,86	1	0,938	2	9,39	2	3,74	3	2,8
HD (1979)	17,5	3	13,7	3	1,35	9	4,44	1	1,114	3	0,84	3	0,931	3	10,66	3	3,79	2	3,3
BA (2002)	27,6	4	23,4	4	0,55	2	-0,15	7	1,198	4	0,70	4	0,850	4	13,81	4	3,13	5	4,2
LJ (1961)	27,6	5	23,4	5	0,55	3	-0,15	8	1,198	5	0,70	5	0,850	5	13,81	5	3,13	6	5,2
KO (1986)	42,8	6	39,8	6	0,35	1	-0,41	9	1,345	6	0,56	6	0,722	6	21,83	6	2,97	7	5,9
MI (1983)	58,5	7	57,1	7	0,78	5	2,63	5	1,508	7	0,55	7	0,618	7	39,65	7	3,21	4	6,2
TI (2001)	124,4	8	121,7	8	-0,58	4	0,53	6	2,081	8	-0,51	8	0,335	8	40,31	8	1,67	8	7,3
SU (1980)	148,6	9	146,5	9	-1,19	6	3,41	4	2,313	9	-0,55	9	0,296	9	50,22	9	1,61	9	8,1

Tabla 5: Valores de los parámetros estadísticos analizados para determinar la capacidad predictiva de los modelos. Los modelos están ordenados de mejor a peor predictor para la radiación fotosintéticamente activa en un plano inclinado a 90°.

Los errores cuadráticos medios, *RMSE%*, obtenidos al comparar los valores medidos y los estimados, varían entre 7,0 % y 17,2 % para un plano inclinado a 30°; entre 6,7 % y 27,2 % para 45°; entre 8,2 % y 42,2 % para 60°; y para el plano vertical van de un 13,0 % en el mejor de los casos hasta un 148,6% en el peor de los casos. Para planos inclinados entre 30° y 60° la mayoría de los modelos tienden a subestimar los valores reales (valores de *MBE%* negativos), mientras que todos tienden a sobreestimar la radiación incidente en el plano vertical (valores de *MBE%* positivos). Las diferencias en los parámetros estadísticos se incrementan a medida que aumenta la inclinación del plano, pero esto podría ser consecuencia de que los peores modelos se comportan muy mal para ángulos grandes, aumentando la brecha.

En la Tabla 6 se presenta el orden en que quedan los nueve modelos estudiados al promediar su comportamiento para los cuatro planos inclinados considerados. En ella puede verse que los modelos anisotrópicos tienen un comportamiento mejor que los isotrópicos, quedando en primer lugar el modelo propuesto por Skartveit y Olseth (1986). El mejor de los modelos isotrópicos resultó ser el de Koronakis (1986), mientras que el peor de los modelos fue claramente el de Steven y Unsworth (1980).

Modelo	Orden promedio
Skartveit y Olseth (1986) (A)	3,4
Hay (1979) (A)	3,8
Ma-Iqbal (1983) (A)	4,1
Reindl y otros (1990) (A)	4,2
Koronakis (1986) (I)	4,8
Liu y Jordan (1961) (I)	5,1
Badescu (2002) (I)	6,1
Tian (2001) (I)	6,3
Steven y Unsworth (1980) (I)	7,3

Tabla 6: Capacidad predictiva de los nueve modelos estudiados. (A) indica que el modelo es anisotrópico e (I) que es isotrópico.

CONCLUSIONES

Los modelos que mostraron mejor respuesta fueron el de Ma e Iqbal (1983) para los planos inclinados a 30° y 45°, el de Skartveit y Olseth (1986) para el plano inclinado a 60° y el de Reindl (1990) para el plano vertical, todos anisotrópicos. Para los planos inclinados 30°, 45° y 60° la mayoría de los modelos tienden a subestimar los valores medidos, mientras que para el plano vertical todos tienden a sobreestimar.

Promediando para los cuatro planos la capacidad predictiva se encontró que el modelo propuesto por Skartveit y Olseth (1986) fue el que mejor desempeño presentó, y los cuatro primeros puestos del “ranking” fueron ocupados por los modelos anisotrópicos, desplazando a las últimas posiciones a los modelos isotrópicos. El modelo de Steven y Unsworth (1980) fue el que peor desempeño mostró.

A partir de los resultados obtenidos es posible decir que los modelos propuestos para estimar la radiación solar global en planos inclinados pueden ser utilizados para estimar la radiación fotosintéticamente activa. La magnitud de los errores obtenidos es del mismo orden de magnitud que los que han obtenido otros autores al utilizarlas para la estimación de la radiación global (Ma e Iqbal, 1983; Evseev y Kudish, 2009) y los ajustes encontrados en la validación fueron muy buenos. Cabe mencionar que parte del error en la estimación de la radiación en los planos inclinados en este trabajo proviene de estimar la radiación fotosintéticamente activa difusa, el cual no podemos cuantificar porque no poseemos datos medidos de Q_d en Luján. Además, se están realizando en este momento mediciones de Q_β sin dejar que la fracción de radiación difusa reflejada por el suelo llegue a los sensores, lo que permitirá hacer un análisis del efecto del albedo en estas estimaciones.

NOMENCLATURA

Q	radiación fotosintéticamente activa global diaria [mol m^{-2}]
Q_0	radiación fotosintéticamente activa extraterrestre diaria incidente en una superficie horizontal [mol m^{-2}]
Q_d	radiación fotosintéticamente activa difusa diaria [mol m^{-2}]
Q_b	radiación fotosintéticamente activa directa [mol m^{-2}]
Q_β	radiación fotosintéticamente activa en plano inclinado [mol m^{-2}]
$Q_{\beta b}$	radiación fotosintéticamente activa directa diaria en superficie inclinada un ángulo β [mol m^{-2}]
$Q_{\beta d}$	radiación fotosintéticamente activa difusa diaria en superficie inclinada un ángulo β [mol m^{-2}]
$Q_{\beta r}$	radiación fotosintéticamente activa reflejada difusamente por el suelo e incide en superficie inclinada un ángulo β [mol m^{-2}]
D	día juliano
K_{TPAR}	índice de claridad para el rango fotosintéticamente activo del espectro [Q/Q_0]
I_{OPAR}	constante solar a la distancia media entre la Tierra y el Sol para el rango fotosintéticamente activo del espectro [$2423,45 \text{ mol m}^{-2}$]
β	ángulo de inclinación del plano o superficie receptora [$^\circ$]
ω_s	ángulo horario al ocaso o al alba (-, +) [$^\circ$]
ϕ	latitud [$^\circ$]
δ	declinación solar [$^\circ$]
ρ	reflectividad del suelo (albedo)
AS	puntaje de precisión
$Skew$	asimetría
d	índice de concordancia de Willmot

REFERENCIAS

- Badescu V. (2002). 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renewable Energy* 26, 221-233.
- Negri M.J. (2011). Relación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en Luján, Buenos Aires, Argentina. Actas XIV Congreso Latino-Americano e Ibérico de Meteorología. Setúbal, Portugal.
- Evseev E.G. y Kudish A.I. (2009). The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. *Solar Energy* 83, 377-388.
- Hay J.E. (1979). Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy* 23, 301-307.
- Jacovides C.P., Boland J., Asimakopoulos D.N. y Kaltsounides N.A. (2010). Comparing diffuse radiation models with one predictor for partitioning incident PAR radiation into its diffuse component in the Eastern Mediterranean basin. *Renewable Energy* 35, 1820-1827.
- Koronakis P.S. (1986). On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Solar Energy* 36, 3, 217-225.
- Liu B.Y.H. y Jordan R.C. (1963). The Long Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors. *Solar Energy* vol. 7 No. 2, pp. 53-74.
- Ma C.C.Y. e Iqbal M. (1983). Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces. *Solar Energy* 31, 3, 313-317.
- Muneer T. y Munawwar S. (2006). Improved accuracy models for hourly diffuse solar radiation. *Journal of Solar Energy Engineering* 128, 104-117.
- Reindl D., Beckman A., Duffie J. (1990). Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* 45, 1, 1-7.
- Skartveit A. y Olseth J.A. (1986). Modelling slope irradiance at high latitudes. *Solar Energy* 36, 4, 333-344.

- Steven M.D. y Unsworth M.H. (1980). The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 106, 57-61.
- Stone R.J. (1993). Improved statistical procedure for the evaluation of solar-radiation estimation models. Solar Energy 51, 289-291.
- Tian Y.Q., Davies-Colley R.J., Gong P. y Thorrold B.W. (2001). Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. Agricultural and Forest Meteorology 109, 67-74.
- Willmott C.J. (1981). On the validation of models. Physical Geography 2, 184-194.

ANALYSIS OF DIFFERENT MODELS USED TO ESTIMATE PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION ON TILTED SURFACES

ABSTRACT: Nine models used for estimating solar radiation incidence on a tilted plane were applied to determine how much photosynthetically active radiation was received on 30°, 45°, 60° and 90° tilted surfaces, facing north. The results were validated against measured data collected during three months in Luján from a statistical analysis based on the following parameters: *RMSE%*, *MBE%*, R^2 , *t*-statistic, accuracy score (*AS*) and agreement index (*d*). The models tend to underestimate the radiation received on 30°, 45° and 60° tilted surfaces and to overestimate the incident radiation on the vertical plane. Analyzing all validation criteria, the anisotropic models show a better performance than the isotropic models, but no one model is highlighted as the best estimator of the incident radiation on the four considered planes.

Keywords: Models, tilted surface, photosynthetically active radiation