

COMPARACIÓN DE MODELOS EMPÍRICOS DE ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN PLANO INCLINADO

M.J. Denegri^{1,2}

¹Meteorología Agrícola, Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján

²Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar)

Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES-CONICET)

Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Av. Constitución - C.P. 6700 – Luján

Tel: 02323-440241 e-mail: mariajose_denegri@yahoo.com

Recibido 02/09/15, aceptado 02/10/15

RESUMEN: El aprovechamiento energético de la radiación solar está creciendo de forma sostenida en todo el mundo. Sudamérica en general y Argentina en particular, muestran en la actualidad un gran interés en él. Contar con información precisa sobre la irradiación solar global incidente sobre una superficie inclinada es importante para dimensionar los sistemas de aprovechamiento del recurso solar. Teniendo en cuenta la complejidad de la modelización de la radiación en plano inclinado y la dependencia de los modelos con las condiciones atmosféricas de cada lugar, surge así la necesidad de determinar cuál es el modelo que mejor predice la irradiación solar global en plano inclinado en Luján, para luego poder definir la orientación e inclinación que debería tener un plano para maximizar la ganancia de energía colectada. El objetivo de este trabajo es validar, con mediciones tomadas en la estación radiométrica de la Universidad Nacional de Luján, 11 modelos para predecir la irradiación solar global diaria en un plano inclinado 42° orientado al Norte. Los modelos tienen como variable de entrada la radiación solar global, directa y difusa. Los mismos fueron validados y comparados entre sí mediante distintos estimadores estadísticos. Al cotejar valores medidos con valores estimados se observaron desvíos cuadráticos medios relativos que varían entre 4,8 % y 15,9 % siendo los modelos isotrópicos de Liu-Jordan y Koronakis, y los anisotrópicos de Reindl y Klucher los que mejor desempeño presentaron.

Palabras clave: radiación solar global, plano inclinado, modelos empíricos de estimación.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento energético de la radiación solar está creciendo de forma sostenida en todo el mundo. Sudamérica en general, y Argentina en particular, muestran en la actualidad un gran interés en él. El secado de especies vegetales, el calentamiento de agua y la generación de electricidad son algunas de las aplicaciones posibles de la energía que proviene del Sol (Righini y Grossi Gallegos, 2011). Una evaluación correcta de la energía disponible para estos procesos (o sea, la incidente sobre un plano inclinado) reviste gran importancia, no sólo porque es fundamental para realizar un dimensionamiento y diseño adecuado de los sistemas de aprovechamiento, sino también por la implicancia económica que los mismos traen aparejada.

La intensidad de la radiación solar global y difusa se mide, en general, sobre superficies horizontales, mientras que los sistemas estacionarios de conversión solar están inclinados hacia el Sol de manera de maximizar la cantidad de radiación solar incidente en la superficie del colector (Evseev y Kudish, 2009). Consecuentemente, la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada debe ser determinada mediante la conversión de las intensidades de la radiación solar medidas en la superficie horizontal a las correspondientes incidentes sobre la superficie inclinada de interés. Existe un gran número de modelos diseñados con este fin, pero debido a la variabilidad en la composición atmosférica es necesario que, antes de utilizar alguno de ellos, éstos sean validados para la zona en donde serán empleados, ya que errores en la determinación del recurso harían que se sobre o subdimensionen los sistemas de aprovechamiento y se estime de manera errónea su productividad.

Existe un número relativamente grande de modelos que tratan de correlacionar la radiación difusa sobre una superficie inclinada con la que se mide sobre una superficie horizontal. La abundancia de tales modelos da fe de la complejidad de la tarea de convertir la componente difusa medida en el plano horizontal a una superficie inclinada y orientada. Los modelos de transposición que se encuentran disponibles en la bibliografía para pasar del plano horizontal a plano inclinado tienen diferente grado de complejidad de acuerdo a que consideren o no la anisotropía de la radiación difusa y la posibilidad de variar libremente la orientación azimutal.

Numerosos trabajos (Kudish and Ianetz, 1991; Kambezidis y otros, 1994; Nijmeh and Mamlook, 2000; Bilbao y otros, 2003; Diez-Mediavilla y otros, 2005; Kamali y otros, 2006; Notton y otros, 2006; Evseev y Kudish, 2009) se han realizado para comparar el comportamiento de los modelos de transposición en diferentes lugares y bajo diferentes condiciones. En la mayoría de ellos se concluye que la capacidad de estos modelos para predecir la irradiación solar global en plano inclinado depende de la época del año y de las condiciones climáticas del lugar.

En Argentina, Righini y Grossi Gallegos (1999, 2011) utilizaron el modelo de Liu y Jordan (1961) y la base de datos de la Red Solarimétrica para determinar los ángulos óptimos de inclinación para distintos sitios del territorio nacional, y presentaron la carta anual de energía solar colectada con esos ángulos. También determinaron los ángulos óptimos de inclinación para el invierno, ya que si se varía la inclinación del plano en este período la colecta anual de energía aumenta.

Atendiendo a la posibilidad de aprovechar el recurso solar en el área de influencia de la Universidad Nacional de Luján y teniendo en cuenta la complejidad de la modelización de la radiación en plano inclinado y la dependencia de los modelos con las condiciones atmosféricas de cada lugar, surge así la necesidad de determinar cuál es el modelo que mejor predice la irradiación solar global en plano inclinado en Luján, para luego poder definir la orientación e inclinación que debería tener un plano para maximizar la ganancia de energía colectada.

El objetivo de este trabajo es validar, con mediciones tomadas en la estación radiométrica de la Universidad Nacional de Luján, 11 modelos para predecir la irradiación solar global diaria en un plano inclinado 42° orientado al Norte. Los modelos tienen como variable de entrada la radiación solar global, directa y difusa. A su vez los distintos modelos se compararon entre sí, cuantificando su capacidad predictiva relativa mediante un conjunto de estimadores estadísticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos experimentales

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron integrales diarias simultáneas de irradiación solar global en plano horizontal, obtenidas con un piranómetro CM11 de Kipp & Zonen, de irradiación solar directa en incidencia normal obtenidas con un pirheliómetro modelo NIP de EPPLEY y de irradiación solar difusa medida con un sensor EPPLEY 8-48 sombreado por una esfera, ambos montados en un trackeador Solys II de la firma Kipp & Zonen, obtenidas en la Estación Solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján (34° 35' S, 59° 03' W, 20 msnm) durante el periodo marzo de 2014 – abril de 2015. Las mediciones de irradiación solar global, directa y difusa se efectuaron cada 1 minuto, y luego se calcularon las integrales diarias.

Las mediciones de irradiación solar global en plano inclinado se realizaron con un sensor fotovoltaico fabricado en el Departamento de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Se midió cada 10 minutos en una superficie inclinada formando un ángulo de 42° con la horizontal, orientada al Norte, inclinación en la que se encuentra un colector solar utilizado para calentamiento de agua y luego se calcularon las integrales diarias.

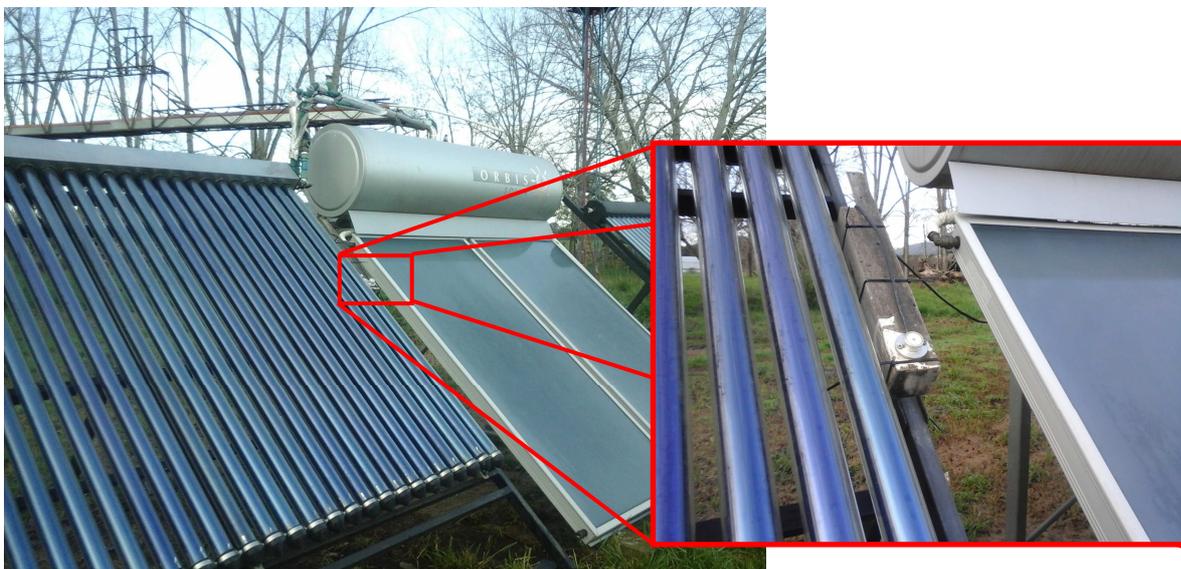


Figura 1: Sensor fotovoltaico utilizado para medir la irradiación solar global en un plano inclinado 42° orientado al Norte en el campo experimental de la Universidad Nacional de Luján.

Irradiación solar directa y difusa

En una primera etapa trabajamos con las mediciones de irradiación solar directa (H_b), difusa (H_d) y global (H) disponible en base diaria como dato de entrada en los modelos de transposición para pasar de plano horizontal a plano inclinado. En una segunda etapa, trabajamos sólo con las mediciones de irradiación solar global, a partir de las cuales estimamos los valores de irradiación solar difusa con el modelo de Boland y otros (2001) y de directa como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$H_d = \frac{H}{1 + \exp(-5.0033 + 8.6025K_T)} \quad (1)$$

$$H_b = H - H_d \quad (2)$$

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (3)$$

siendo, K_T el índice de claridad y H_0 (MJ/m^2) la irradiación diaria sobre plano horizontal a tope de atmósfera.

Modelos para la estimación de la irradiación solar en planos inclinados

A continuación se detallan los 11 modelos analizados, todos consideran que la irradiación solar que llega a un plano inclinado (H_β) está compuesta por tres flujos: radiación directa ($H_{\beta,b}$), radiación difusa de cielo ($H_{\beta,d}$) y radiación reflejada difusamente por el suelo ($H_{\beta,r}$).

$$H_\beta = H_{\beta,b} + H_{\beta,d} + H_{\beta,r} \quad (4)$$

siendo $H_{\beta,b}$, $H_{\beta,d}$ y $H_{\beta,r}$ dependientes de la irradiación directa (H_b), difusa (H_d) y global (H) incidente en el plano horizontal, respectivamente (ecuaciones 5 a 7).

$$H_{\beta,b} = R_b H_b \quad (5)$$

$$H_{\beta,d} = R_d H_d \quad (6)$$

$$H_{\beta,r} = R_r H \quad (7)$$

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 (4) puede escribirse como se muestra en la ecuación (8):

$$H_\beta = R_b H_b + R_d H_d + R_r H \quad (8)$$

La radiación reflejada difusamente por el suelo ($H_{\beta,r}$) 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 9):

$$R_r = \rho \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (9)$$

Kambezidis y otros (1994) usaron tres modelos para la reflectancia del suelo: albedo constante, albedo variando estacionalmente y albedo anisotrópico, pero ellos muestran que usando un albedo anisotrópico o variando estacionalmente no se mejora la performance de la estimación comparada con la utilización de un albedo fijo, entonces aquí para simplificar los cálculos consideramos para el albedo un valor constante e igual a 0,3, ya que es un valor apropiado para suelos con cobertura vegetal como la que existe en la estación meteorológica de la UNLu.

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 (10):

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s' + \frac{\pi}{180} \omega_s' \operatorname{sen}(\phi - \beta) \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta} \quad (10)$$

donde ω_s' 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; δ es la declinación, ϕ es la latitud y β la inclinación del plano.

Para estimar el cociente entre la irradiación 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; Liu y Jordan, 1963). Hay (1979) propone 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. Otros además, consideran una tercera componente, conocida como brillo del horizonte y que es más notable en días claros (Reindl, 1990; Skartveit y Olseth, 1986; Ma e Iqbal, 1983; Willmot, 1982; Klucher, 1979; Temps y Coulson, 1977). 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 irradiación solar global recibida en un plano inclinado a 42° ($\beta = -42^\circ$), para la latitud de Luján, orientado al Norte y para un período coincidente con el que se registraron las mediciones, de manera de poder realizar una validación.

Validación de los resultados

Para la validación de los resultados fueron utilizadas las integrales diarias de irradiación global medidas en un plano inclinado 42° , orientado al Norte en la estación de Luján. Los valores diarios estimados ($H_{42,est}$) con los 11 modelos se graficaron en función de los valores medidos ($H_{42,obs}$) 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 ($H_{42,est} - H_{42,obs}$). 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.

Modelo	$R_d =$	Tipo
Liu y Jordan (1963)_LJ	$(1 + \cos\beta)/2$	Isot.
Koronakis (1986)_KO	$(2 + \cos\beta)/3$	Isot.
Tian (2001)_TI	$1 - \beta/180$	Isot.
Badescu (2002)_BA	$(3 + \cos(2\beta))/4$	Isot.
Temps y Coulson (1977)_TC	$(1 + \cos\beta)/2 (1 + \sin^3(\beta/2)) (1 + \cos^2(\theta) \sin^3(\theta))$	Anisot.
Klucher (1979)_KL	$(1 + \cos\beta)/2 (1 + F\sin^3(\beta/2)) (1 + F\cos^2(\theta) \sin^3(\theta))$	$F=1 - (H_d/H)^2$ Anisot.
Hay (1979)_HD	$(H_b/H_0) R_b + (1 - H_b/H_0) (1 + \cos\beta)/2$	Anisot.
Willmot (1982)_WI	$H_{bn}R_b/I_{SC} + C_\beta (1 - H_{bn}/I_{SC})$	$C_\beta = 1,0115 - 0,20293\beta - 0,080823\beta^2$ Anisot.
Ma-Iqbal (1983)_MI	$K_T R_b + (1 - K_T \cos^2(\beta/2))$	Anisot.
Skartveit y Olseth (1986)_SO	$(H_b/H_0) R_b + \Omega \cos(\beta) + (1 - H_b/H_0 - \Omega) (1 + \cos\beta)/2$	$\Omega = \max[0; (0,3-2 H_b/H_0)]$ Anisot.
Reindl y otros (1990)_RE	$(H_b/H_0) R_b + (1 - H_b/H_0) ((1+\cos\beta)/2) (1+(H_b/H)^{1/2} \sin^3(\beta/2))$	Anisot.

θ : ángulo de incidencia; θ_c : ángulo cenital; I_{SC} : constante solar; H_{bn} : irradiación directa normal.

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

También se clasificó la habilidad predictiva relativa de los 11 modelos a partir del índice de concordancia, d , de Willmot (1981), el estadístico-t (Stone, 1993) y la suma de los desvíos, SD , de Munawwar y Muneer (2007). El mejor modelo estará asociado al mayor valor del índice d ($0 \leq d \leq 1$) y al menor valor de los estadísticos t y SD . Las expresiones utilizadas para calcularlos se listan en las ecuaciones (11) a (13):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (H_{\betaesti} - H_{\betaobsi})^2}{\sum_{i=1}^N \left(\left| H_{\betaesti} - \overline{H_{\betaobs}} \right| - \left| H_{\betaobsi} - \overline{H_{\betaobs}} \right| \right)^2} \quad (11)$$

$$t = \left(\frac{(n-1)MBE_i^2}{RMSE_i^2 - MBE_i^2} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$SD = \frac{abs(MBE_i)}{abs(MBE_i)_{max}} + \frac{RMSE_i}{RMSE_{i,max}} \quad (13)$$

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

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estimadores estadísticos obtenidos para cada modelo se presentan en las Tablas 2 y 3. 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 surge 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. Los valores presentados en la Tabla 2 corresponden a los resultados obtenidos por los modelos cuando se utiliza la irradiación solar global como único dato de entrada (309 días con dato) y en la Tabla 3 se presentan los mismos indicadores, pero ahora obtenidos utilizando como dato de entrada la irradiación solar global, difusa y directa incidentes en plano horizontal (114 días analizados).

Modelo	RMSE%		MBE%		asimetría		curtosis		pendiente de la recta de ajuste	
	valor	orden	Valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	Orden
Liu y Jordan (1963)_LJ	7,7	2	-0,6	1	0,199	3	-0,237	8	1,032	3
Klucher (1979)_KL	7,4	1	3,5	3	0,470	10	0,107	1	1,060	7
Koronakis (1986)_KO	7,8	3	0,8	2	0,197	2	-0,293	9	1,032	4
Reindl y otros (1990)_RE	8,4	5	3,6	4	0,245	5	-0,139	5	1,093	10
Badescu (2002)_BA	8,6	7	-4,1	5	0,181	1	-0,194	7	1,028	2
Temps y Coulson (1977)_TC	8,2	4	6,0	8	0,475	11	0,072	3	1,012	1
Skartveit y Olseth (1986)_SO	8,6	8	4,3	6	0,252	6	-0,141	6	1,095	11
Hay (1979)_HD	8,6	6	4,5	7	0,260	7	-0,072	4	1,087	9
Willmot (1982)_WI	11,2	9	7,4	9	0,242	4	-0,523	10	1,033	6
Ma-Iqbal (1983)_MI	14,6	11	13,3	11	0,367	9	0,095	2	1,065	8
Tian (2001)_TI	14,5	10	11,2	10	0,298	8	-0,525	11	1,032	5

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 de la irradiación solar global en un plano inclinado 42°.

Modelo	R ²		d		t		SD		Orden
	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	Promedio
Liu y Jordan (1963)_LJ	0,975	8	0,993	2	1,35	1	0,57	1	3,2
Klucher (1979)_KL	0,985	4	0,994	1	9,43	4	0,77	3	3,8
Koronakis (1986)_KO	0,975	9	0,993	3	1,82	2	0,59	2	4,0
Reindl y otros (1990)_RE	0,985	6	0,992	4	8,47	3	0,84	4	5,1
Badescu (2002)_BA	0,975	7	0,991	8	9,51	5	0,90	5	5,2
Temps y Coulson (1977)_TC	0,986	2	0,992	5	18,90	9	1,01	8	5,7
Skartveit y Olseth (1986)_SO	0,985	3	0,992	6	9,95	6	0,91	6	6,4
Hay (1979)_HD	0,985	5	0,992	7	10,92	7	0,93	7	6,6
Willmot (1982)_WI	0,970	10	0,985	9	15,49	8	1,33	9	8,2
Ma-Iqbal (1983)_MI	0,988	1	0,976	10	38,10	11	2,00	11	8,2
Tian (2001)_TI	0,964	11	0,976	11	21,20	10	1,83	10	9,6

Tabla 2: Continuación

El RMSE% el del orden del 7,5 % para los modelos que mejor desempeño presentan y llega a ser de casi el 15 % en los de peor comportamiento. Se observa una tendencia a sobreestimar los valores reales cuando se estima la irradiación recibida en el plano inclinado partiendo del dato de irradiación solar global. Promediando los indicadores estadísticos, el modelo que mejor representó la irradiación global en un plano inclinado 42° orientado al Norte en Luján fue el isotrópico de Liu y Jordan.

Modelo	RMSE%		MBE%		asimetría		curtosis		pendiente de la recta de ajuste	
	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden
Reindl y otros (1990)_RE	4,8	1	1,8	3	0,156	3	1,074	9	1,036	10
Koronakis (1986)_KO	6,6	7	0,6	1	-0,001	1	1,754	5	1,003	2
Liu y Jordan (1963)_LJ	6,2	6	0,8	2	0,262	4	1,192	8	1,002	1
Klucher (1979)_KL	5,4	4	1,8	4	-0,814	9	6,300	2	1,014	6
Skartveit y Olseth (1986)_SO	5,2	2	2,4	5	0,332	6	1,331	7	1,039	11
Hay (1979)_HD	5,3	3	2,7	6	0,295	5	1,683	6	1,032	9
Temps y Coulson (1977)_TC	5,8	5	3,6	7	-0,106	2	0,863	11	0,981	8
Badescu (2002)_BA	7,0	8	-4,3	8	-0,525	7	0,878	10	0,995	3
Willmot (1982)_WI	11,8	10	7,1	9	1,223	10	5,775	3	1,009	4
Ma-Iqbal (1983)_MI	11,5	9	9,9	10	0,755	8	3,872	4	1,019	7
Tian (2001)_TI	15,9	11	10,9	11	1,595	11	7,220	1	1,012	5

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 de la irradiación solar global en un plano inclinado 42° en función de la irradiación solar global, directa y difusa en plano horizontal.

Modelo	R ²		d		t		SD		Orden
	valor	orden	valor	orden	valor	orden	valor	orden	Promedio
Reindl y otros (1990)_RE	0,993	1	0,998	1	4,25	4	0,47	2	3,8
Koronakis (1986)_KO	0,982	9	0,995	7	0,92	1	0,47	3	4,0
Liu y Jordan (1963)_LJ	0,984	8	0,996	6	1,40	2	0,47	1	4,2
Klucher (1979)_KL	0,989	5	0,997	4	3,83	3	0,51	4	4,6
Skartveit y Olseth (1986)_SO	0,993	2	0,997	2	5,60	5	0,55	5	5,0
Hay (1979)_HD	0,992	3	0,997	3	6,33	6	0,59	6	5,2
Temps y Coulson (1977)_TC	0,991	4	0,996	5	8,31	8	0,70	7	6,3
Badescu (2002)_BA	0,987	6	0,995	8	8,35	9	0,84	8	7,4
Willmot (1982)_WI	0,963	10	0,985	10	8,02	7	1,40	9	8,0
Ma-Iqbal (1983)_MI	0,986	7	0,986	9	17,86	11	1,63	10	8,3
Tian (2001)_TI	0,946	11	0,974	11	9,99	10	2,00	11	9,1

Tabla 3: Continuación

Los errores obtenidos al estimar la irradiación solar global en plano inclinado a partir de los datos medidos de global, directa y difusa en plano horizontal son del orden del 5 % para el mejor de los casos (modelo de Reindl y otros (1990)). Al igual que en el análisis anterior, se observa una tendencia de los modelos a sobreestimar los valores reales, pero en menor medida que cuando se trabaja con el dato de global como única información de entrada.

CONCLUSIONES

Se evaluaron en la localidad de Luján, provincia de Buenos Aires, 11 modelos de transposición empleados para estimar la irradiación solar global en plano inclinado. Mediante distintos estimadores estadísticos se compararon los modelos entre sí estableciendo un orden relativo de sus capacidades predictivas. Los modelos que mostraron mejor respuesta al estimar la irradiación solar global en un plano inclinado 42° orientado al norte en Luján, fueron el isotrópico de Liu y Jordan (1961) cuando se trabajó con la irradiación solar global en plano horizontal como único dato de entrada y el anisotrópico de Reindl y otros (1990) cuando además se consideraron las mediciones de directa y difusa también en plano horizontal. El error cuadrático medio obtenido por estos modelos fue de 7,7 % y 4,8 %, respectivamente, mostrando que cuanto más precisa es la información de entrada mejores resultados pueden esperarse. El modelo de Liu y Jordan tiende a subestimar levemente ($MBE\% = -0,6\%$), mientras que el de Reindl a sobreestimar ($MBE\% = 1,8\%$). La magnitud de los errores obtenidos es del mismo orden que los que han obtenido otros autores (Ma e Iqbal, 1983; Evseev y Kudish, 2009) y los ajustes encontrados en la validación fueron muy buenos.

REFERENCIAS

- Badescu V. (2002). 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renewable Energy* 26, 221-233.
- Bilbao, J., de Miguel, A., Ayuso, A. y Franco, J.A. (2003). Iso-radiation maps for tilted surfaces in the Castile and Leon region, Spain. *Energy Conversion and Management* 44, 1575–1588.
- Boland J, Scott L, Luther M. (2001) Modeling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. *Environmetrics* 2001;12:103-16.
- Diez-Mediavilla, M., de Miguel, A. y Bilbao, J. (2005). Measurement and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain). *Energy Conversion and Management* 46, 2075–2092.
- 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). Study of shortwave radiation on non-horizontal surfaces. Rep. 79-12, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario. (Citado por Notton y otros, 2006).
- Kamali, G.A. Moradi, I y Khalili, A. (2006). Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran). *Theoretical and Applied Climatology* 84, 235-241.
- Kambezidis, H.D., Psiloglou, B.E. y Gueymard C. (1994). Measurements and models for total solar irradiance on inclined surface in Athens, Greece. *Solar Energy* 53, 2, 177-185.
- Klucher, T.M. (1979). Evaluating models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23, pp. 111-114.
- 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.
- Kudish, A.I. y Ianetz, A., (1991). Evaluation of the relative ability of three models, the isotropic, Klucher and Hay, to predict the global radiation on a tilted surface in Beer Sheva, Israel. *Energy Conversion & Management* 32, 387–394.
- Liu, B.Y.H. y Jordan, R.C. (1961). Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *ASHRAE J.* 3(10), 53-59. (citado en Klucher, 1979).
- 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, 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, pp. 313-317.
- Munawwar, S. y Muneer, T. (2007). Statistical approach to the proposition and validation of daily diffuse models. *Applied Energy* 84, 455-475.
- Nijmeh, S. y Mamlook, R. (2000). Testing of two models for computing global solar radiation on tilted surfaces. *Renewable Energy* 20, 75–81.
- Notton, G., Cristofari, C. y Poggi, P. (2006). Performance evaluation of various hourly slope irradiation models using Mediterranean experimental data of Ajaccio. *Energy Conversion and Management* 47, 147-173.
- Reindl, D., Beckman, A. y Duffie, J. (1990). Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* 45, 1, 1-7.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (1999). Ángulos sugeridos para optimizar la colección anual de irradiación solar diaria en Argentina sobre planos orientados al Norte. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 3 N° 2, pp. 11.33-11.37.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2011). Mapa de energía solar colectada anualmente por un plano inclinado. Un ángulo óptimo en la República Argentina. Cuarto Congreso Nacional y Tercer Congreso Iberoamericano de Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía HYFUSEN, 11-161.
- Skartveit, A. y Olseth, J.A. (1986). Modelling slope irradiance at high latitudes. *Solar Energy* 36, 4, pp. 333-344.
- Stone, R.J. (1993). Improved statistical procedure for the evaluation of solar-radiation estimation models. *Solar Energy* 51, 289–291.
- Temps, R.C. y Coulson, K.L. (1977). Solar radiation incident upon slopes of different orientation. *Solar Energy* 19, 2, 179-184.
- 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.
- Willmott, C.J. (1982). On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors. *Solar Energy* 28, 3, 205-216. (Citado por Notton y otros, 2006).

ASSESSMENT OF EMPIRICAL MODELS TO PREDICT THE GLOBAL SOLAR RADIATION ON A TILTED SURFACE.

ABSTRACT: The energy use of solar radiation is growing steadily worldwide. South America in general and Argentina particularly, show a great interest in it currently. Accurate information of global solar radiation incident on a tilted surface is important for dimensioning solar use systems. Modeling solar radiation on a tilted plane is complex. The models present a dependence with weather conditions. The aim of this work is to validate, with radiation measurements taken at the solarimetric station of the Universidad Nacional de Luján, 11 models to predict the daily global solar irradiation in a 42° inclined plane facing north. The models were validated and compared using different statistical indicators. Root mean square relative errors, RMSE%, from 4.8 % to 15.9 were obtained. The isotropic models of Liu-Jordan and Koronakis, and the anisotropic models of Klucher and Reindl presented the best performance.

Keywords: global solar radiation, tilted plane, transposition correlations.