

ESTIMACIÓN DE LA IRRADIACIÓN GLOBAL HORARIA EN UNA SUPERFICIE INCLINADA Y CON DIFERENTES ORIENTACIONES EN LUJÁN

M.J. Denegri^{1,2}

¹Meteorología Agrícola, Departamento de Tecnología.

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 08/08/16, aceptado 09/10/16

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es comparar el comportamiento de tres modelos utilizados con frecuencia para estimar la irradiación solar global incidente en plano inclinado, el isotrópico de Liu y Jordan y los anisotrópicos de Klucher y Reindl. Se estimó la irradiación incidente en 4 planos inclinados 45° con respecto a la horizontal y orientados al Este, Noreste, Noroeste y Oeste. Luego se compararon estas estimaciones con valores medidos en la estación radiométrica de la Universidad Nacional de Luján y se estimaron diferentes parámetros estadísticos para determinar cuál de los modelos se comportó mejor. Todos los modelos subestimaron a los valores medidos. El que mejores resultados arrojó fue el de Klucher, pero con errores que alcanzan el 30%, 28%, 31% y 26% al estimar la irradiación incidente en un plano orientado al E, NE, NO y O, respectivamente.

Palabras clave: modelos de descomposición, variación acimutal del plano.

INTRODUCCION

Para diversas aplicaciones energéticas del recurso solar, es necesario conocer la irradiación solar incidente sobre una superficie inclinada y orientada. Usualmente, no se dispone de mediciones para la superficie de interés, motivo por el cual generalmente los valores deben ser estimados a partir de la irradiación solar global y difusa medidas en plano horizontal. Conociendo la posición del sol y la orientación de la superficie, el cálculo de la irradiación solar directa sobre una superficie inclinada es bastante sencillo. Para la estimación de la componente difusa se han desarrollado varios modelos.

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 irradiación difusa y la posibilidad de variar libremente la orientación acimutal. Algunos asumen que la intensidad de la radiación difusa de cielo es uniforme independientemente del sector de cielo del cual provenga, denominados modelos isotrópicos (Liu y Jordan, 1961; Koronakis, 1986; Tian et al., 2001; Badescu, 2002). 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 (Temps y Coulson, 1977; Klucher, 1979; Willmot, 1982; Ma e Iqbal, 1983; Skartveit y Olseht, 1986; Gueymard, 1987; Perez, 1990; Reindl et al., 1990). Estos últimos se denominan modelos anisotrópicos.

Numerosos trabajos se han realizado a lo largo del mundo (Kudish and Ianetz, 1991; Kambezidis y otros, 1994; Nijmeh and Mamlook, 2000; Bilbao et al., 2003; Diez-Mediavilla et al., 2005; Kamali y otros, 2006; Notton et al., 2006; Evseev y Kudish, 2009) para comparar el comportamiento de los modelos de transposición 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 propias de cada 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. Denegri (2015), analizó el comportamiento de 11 modelos para estimar la irradiación solar global en un plano inclinado 42° orientado al Norte y concluyó que los modelos que mejor respuesta mostraron al estimar la irradiación solar global diaria 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, con un RMSE de 7,7% y el anisotrópico de Reindl et al. (1990) cuando además se consideraron las mediciones de directa y difusa también en plano horizontal, bajando el RMSE a 4,8%, mostrando que cuanto más precisa es la información de entrada mejores resultados pueden esperarse.

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.

En este trabajo compararemos los 3 modelos de transposición que mejor desempeño presentaron en el trabajo de 2015 con las mediciones horarias realizadas sobre 4 planos inclinados 45° y orientados al Este, Noreste, Noroeste y Oeste, en la estación radiométrica de la Universidad Nacional de Luján, con el objetivo de validar los modelos y determinar el que mejor aproxima los valores medidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Mediciones

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron las integrales horarias de irradiación solar global en plano horizontal, obtenidas con un piranómetro CM11 de Kipp & Zonen cuyo error de medición es del 3%, obtenidas en la Estación Solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján (34° 35' S, 59°03' W, 20 msnm) durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 13 de julio de 2016. El piranómetro se conectó a un sistema automático de adquisición de datos Campbell CR1000, que midió los voltajes provenientes del sensor una vez por segundo y almacenó las integrales de la señal cada 1 minuto. Luego, las mediciones se integraron de forma horaria, y se descartaron los datos de las horas en que la altura solar era inferior a 5° para evita los errores asociados a obstrucciones en el horizonte.

Las mediciones de irradiación solar global en plano inclinado se realizaron con 4 sensores fotovoltaicos fabricados en el Departamento de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) cuyos errores de medición son del 5%. Los sensores fueron conectados a 2 adquirentes de datos marca Novus con dos canales cada uno. Se midió cada 1 minuto y luego se calcularon las integrales horarias en superficies inclinadas formando un ángulo de 45° ($\beta = -45^\circ$) con la horizontal, orientadas al Este ($\gamma = 90^\circ$), Noreste ($\gamma = 45^\circ$), Noroeste ($\gamma = -45^\circ$) y Oeste ($\gamma = -90^\circ$).

Modelos

A partir de las mediciones de irradiación solar global (H) se estimaron los valores de irradiación solar difusa (H_d) con el modelo de Boland et al. (2001) y de directa (H_b) en plano horizontal como se muestra en las siguientes ecuaciones:

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

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

$$K_T = H/H_0 \quad (3)$$

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

Los modelos de transposición utilizados 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 ($H_{\beta,d}$) y radiación reflejada ($H_{\beta,r}$) por el suelo, como se muestra en la ecuación (4).

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

La irradiación directa sobre la superficie inclinada puede ser calculada por la ecuación

$$H_{\beta,b} = H_b R_b = H_b \cos \theta / \cos \theta_z \quad (5)$$

donde H_b es la irradiación directa incidente en el plano horizontal, θ es el ángulo de incidencia sobre la superficie, θ_z es el ángulo cenital y R_b es el factor geométrico.

El ángulo de incidencia sobre la superficie está dado por:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } \delta \text{sen } \varphi \cos \beta - \text{sen } \delta \cos \varphi \text{sen } \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \text{sen } \varphi \text{sen } \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \text{sen } \beta \text{sen } \gamma \text{sen } \omega \end{aligned} \quad (6)$$

donde δ es la declinación solar, φ es la latitud, β es el ángulo de inclinación del plano, γ es el ángulo acimutal del plano receptor y ω es el ángulo horario. Considerando $\beta = 0^\circ$ y $\gamma = 0^\circ$ en la ecuación (6) se llega a la expresión para calcular θ_z .

$$\cos \theta_z = \text{sen } \delta \text{sen } \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (7)$$

Para el cálculo de la radiación reflejada por el suelo, se asume que tanto la componente directa como la difusa son reflejadas isotrópicamente, por lo tanto, la irradiación solar reflejada por el suelo que incide sobre el plano inclinado puede ser calculada como función del albedo y de la inclinación del plano (ecuación 8).

$$H_{\beta,r} = H \rho (1 - \cos \beta) / 2 \quad (8)$$

donde ρ es el albedo del suelo y fue considerado 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 mencionamos en la introducción, hay numerosos modelos para estimar la irradiación solar global que incide sobre un plano inclinado, y que se diferencian en la manera de estimar la componente difusa. Aquí trabajaremos con 3 modelos de transposición, el isotrópico de Liu y Jordan (1961) y los anisotrópicos de Klucher (1979) y Reindl et al. (1990), que fueron los que mejores resultados arrojaron un trabajo previo (Denegri, 2015).

En el caso más simple de un cielo isotrópico, la irradiación difusa sobre el plano inclinado puede ser estimada como:

$$H_{\beta,d_LJ} = H_d (1 + \cos \beta) / 2 \quad (9)$$

El modelo de Klucher agrega una función moduladora F (ecuación 10), que tiene en cuenta el efecto del brillo de cielo cerca del horizonte y la radiación difusa proveniente de la zona circunsolar y simula las condiciones presentes durante cielos parcialmente cubiertos.

$$F = 1 - (H_d/H)^2 \quad (10)$$

$$H_{\beta d_KL} = H_d \left(1 + F \sin^3(\beta/2)\right) \left[1 + F \cos^2 \theta_s \sin^3 \theta_z\right] (1 + \cos \beta)/2 \quad (11)$$

El modelo de Reindl tiene en cuenta los mismos factores que el de Klucher, pero agrega una variante en la función moduladora.

$$H_{\beta d_RE} = H_d \left[(H_b/H_0) R_b + (1 - H_b/H_0) \left(1 + (H_b/H)^{1/2} \sin^3(\beta/2)\right) (1 + \cos \beta)/2 \right] \quad (12)$$

Validación de los resultados

Para la validación de los resultados fueron utilizadas las integrales horarias de irradiación global medidas en los planos inclinados 45°, orientados al Este, Noreste, Noroeste y Oeste en la estación solarimétrica de la UNLu. Los valores diarios estimados con los 3 modelos se graficaron en función de los valores medidos 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 calcularon el error cuadrático medio relativo ($RMSE\%$) y el desvío medio relativo ($MBE\%$). Valores positivos de $MBE\%$ indicarán que el modelo sobreestima los valores reales, mientras que valores negativos indicarán una subestimación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de la irradiación solar global en plano horizontal

Las mediciones de irradiación solar global, en plano horizontal, en Luján para el período analizado se sintetizan en la Figura 1, donde se presentan los valores medios horarios, máximo, mínimo y el intervalo intercuartil. Observando los valores medios, se aprecia una asimetría entre la radiación recibida en el plano horizontal en las horas del amanecer y del atardecer, que puede estar asociada a la diferencia en la distribución de obstáculos del lado E y del lado O (mayor cantidad de obstáculos y más cerca) de la estación radiométrica.

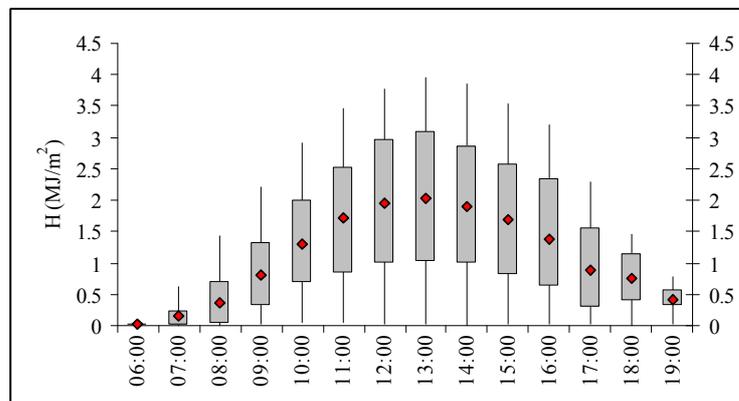


Figura 1: Valores medios horarios (♦), máximo, mínimo e intervalo intercuartil (■) de irradiación global (H) para el período 1 de enero al 13 de julio de 2016 en Luján.

Comportamiento de la irradiación solar global en los planos inclinados y orientados

En las Figuras 2 a 5 se muestra el comportamiento de la irradiación solar global recibida en un plano inclinado 45° con diferentes orientaciones. En los planos orientados al Este y Noreste se observan los valores máximos antes del mediodía, y en los planos orientados al Noroeste y Oeste lo inverso, comportamiento esperado teniendo en cuenta el movimiento aparente del Sol en el cielo. En las curvas de los planos orientados hacia el cuadrante Oeste, llegando al final del día se aprecia el mismo comportamiento que se mostró en la Figura 1, es decir que no encontramos la simetría esperada entre lo medido con el sensor orientado al Este y el sensor orientado hacia el Oeste.

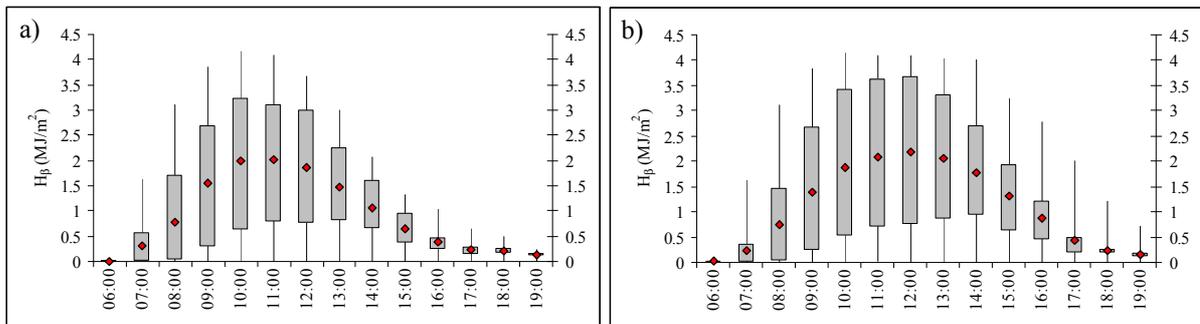


Figura 2: Valores medios horarios (♦), máximo, mínimo e intervalo intercuartil (■) de irradiación global en un plano inclinado 45° (H_{β}): a) orientado al Este (30/01 al 13/07/2016) y b) orientado al Noreste (01/01 al 13/07/2016).

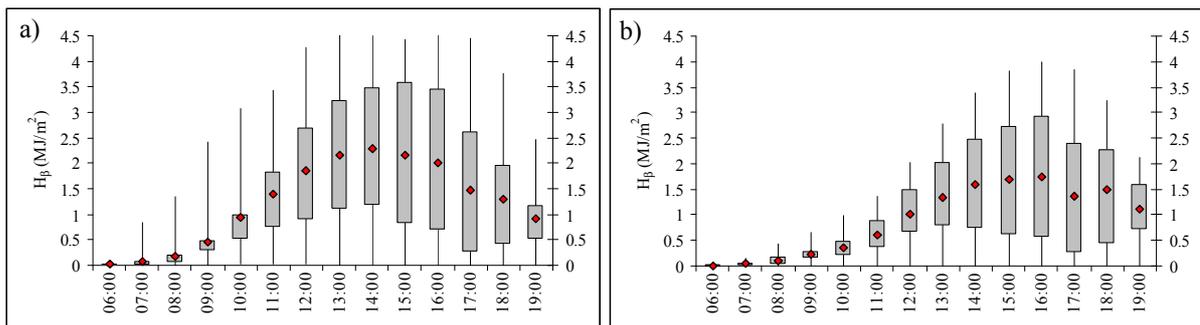


Figura 3: Valores medios horarios (♦), máximo, mínimo e intervalo intercuartil (■) de irradiación global en un plano inclinado 45° (H_{β}): a) orientado al Noroeste (01/01 al 13/07/2016) y b) orientado al Oeste (30/01 al 13/07/2016).

En la Figura 4 se muestra la radiación incidente en cada plano para dos días con cielo claro (todas las horas con $K_T > 0.7$); el 01 de febrero y el 14 de marzo y otro con cielo cubierto (todas las horas con $K_T < 0.3$); el 25 de abril, todos de 2016. Cuando el cielo está cubierto, prácticamente todos los planos reciben la misma cantidad de radiación a lo largo del día (Figura 5). El plano inclinado 45° orientado al Noroeste es el que más radiación capta, sobre todo en horas cercanas al mediodía. En cambio, cuando el cielo se encuentra despejado la radiación captada presenta un comportamiento distinto para cada plano, a excepción de los planos orientados al cuadrante Este en el día de verano (01/02), que presentan diferencias despreciables. Para este día de verano, el plano horizontal fue el que más radiación captó durante todo el día, pero presentando una diferencia mínima con el plano inclinado 45° y orientado hacia el NO. Mientras que en el día claro de otoño (14/03) fue el plano orientado al Noreste el que más radiación recibió a lo largo de todo el día.

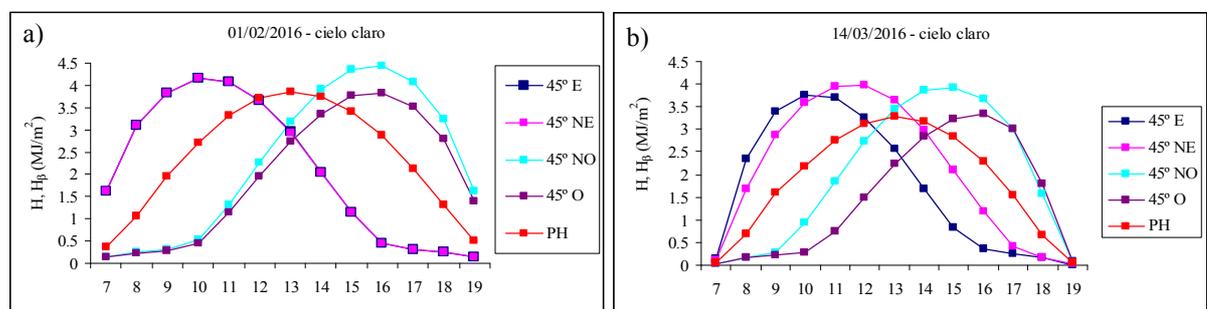


Figura 4: Valores horarios de irradiación global en plano horizontal (■) y un plano inclinado 45° con diferentes orientaciones (E ■, NE ■, NO ■, O ■): a) el 01/02 (cielo claro), b) el 14/03 (cielo claro) y c) el 25/04 (cielo cubierto).

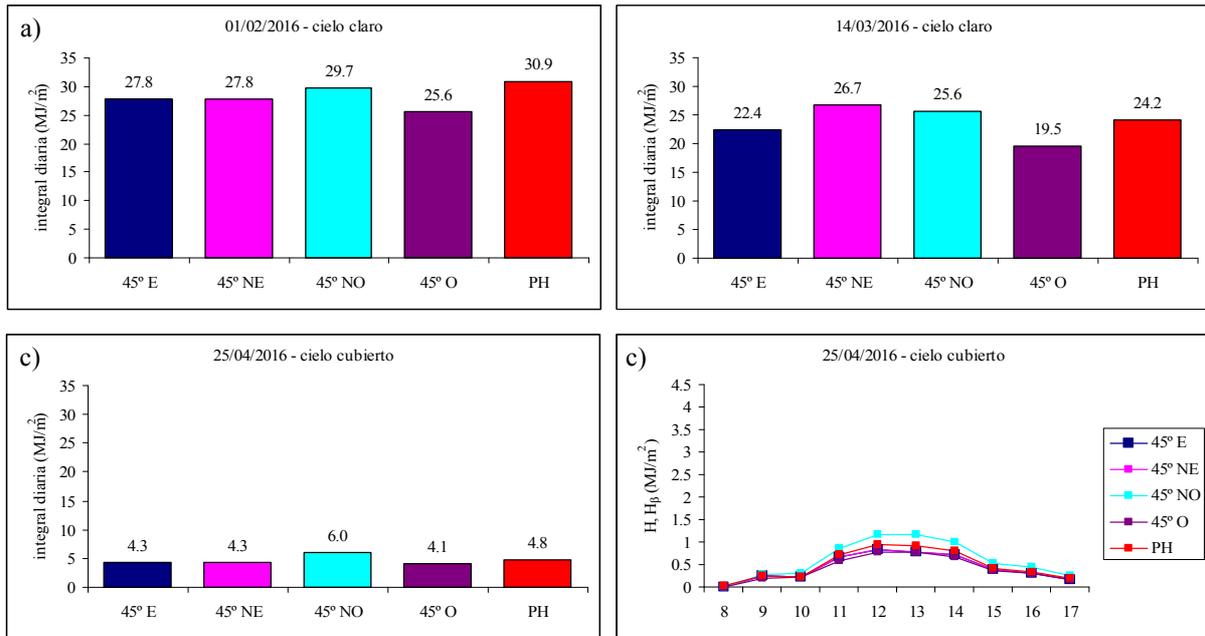


Figura 5: Integrales diarias de irradiación global en plano horizontal (■) y un plano inclinado 45° con diferentes orientaciones (E ■, NE ■, NO ■, O ■): a) el 01/02 (cielo claro), b) el 14/03 (cielo claro) y c) el 25/04 (cielo cubierto).

Comportamiento de los modelos seleccionados para estimar la irradiación solar global en plano inclinado.

En las siguientes Figuras (6 a 9) se presentan los gráficos de dispersión confeccionados con los valores medidos en los planos inclinados y los valores estimados para esos mismos planos. La pendiente de la recta de ajuste y el R^2 obtenidos en cada caso, junto el RMSE% y el MBE% se presentan en la Tabla 1.

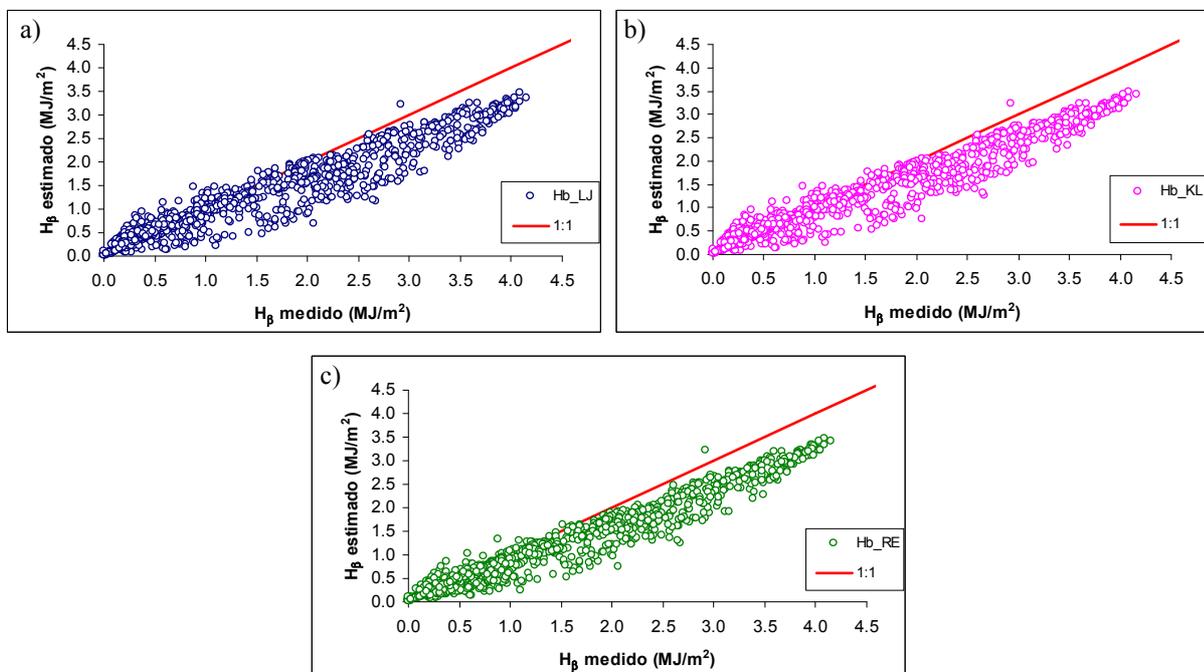


Figura 6: irradiación solar global estimada vs. medida en un plano inclinado 45° orientado al E en Luján con el modelo de: a) Liu y Jordan (1961), b) Klucher (1979) y c) Reindl (1990).

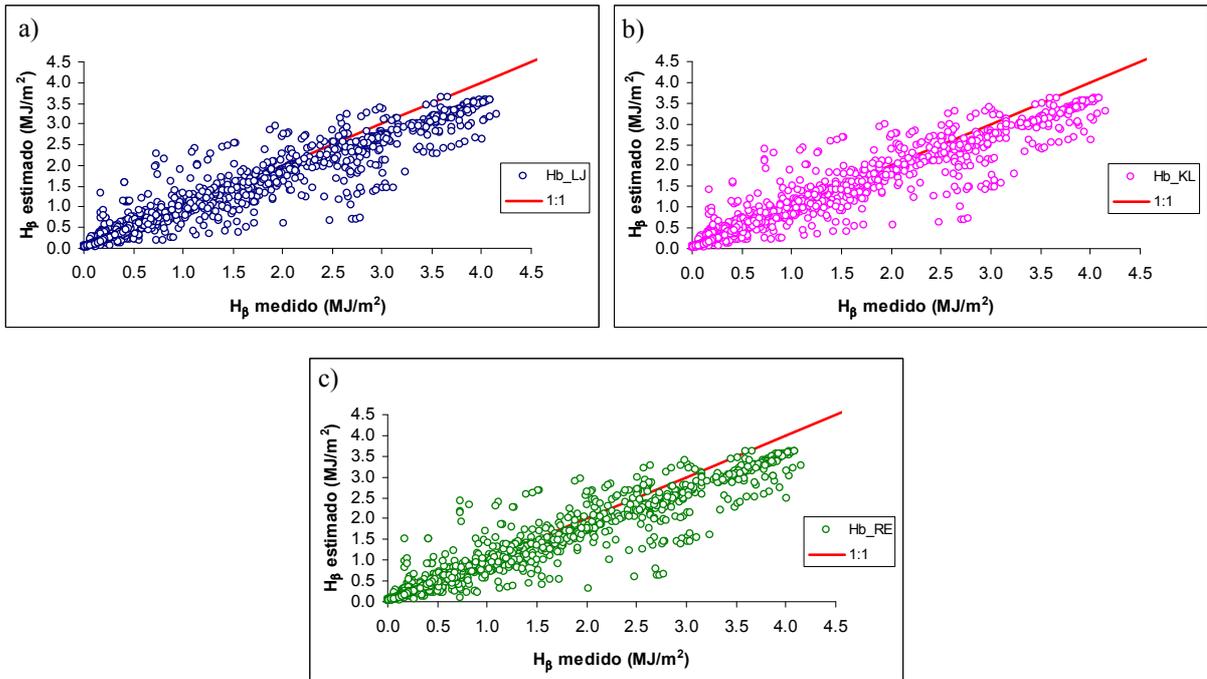


Figura 7: irradiación solar global estimada vs. medida en un plano inclinado 45° orientado al NE en Luján con el modelo de: a) Liu y Jordan (1961), b) Klucher (1979) y c) Reindl (1990).

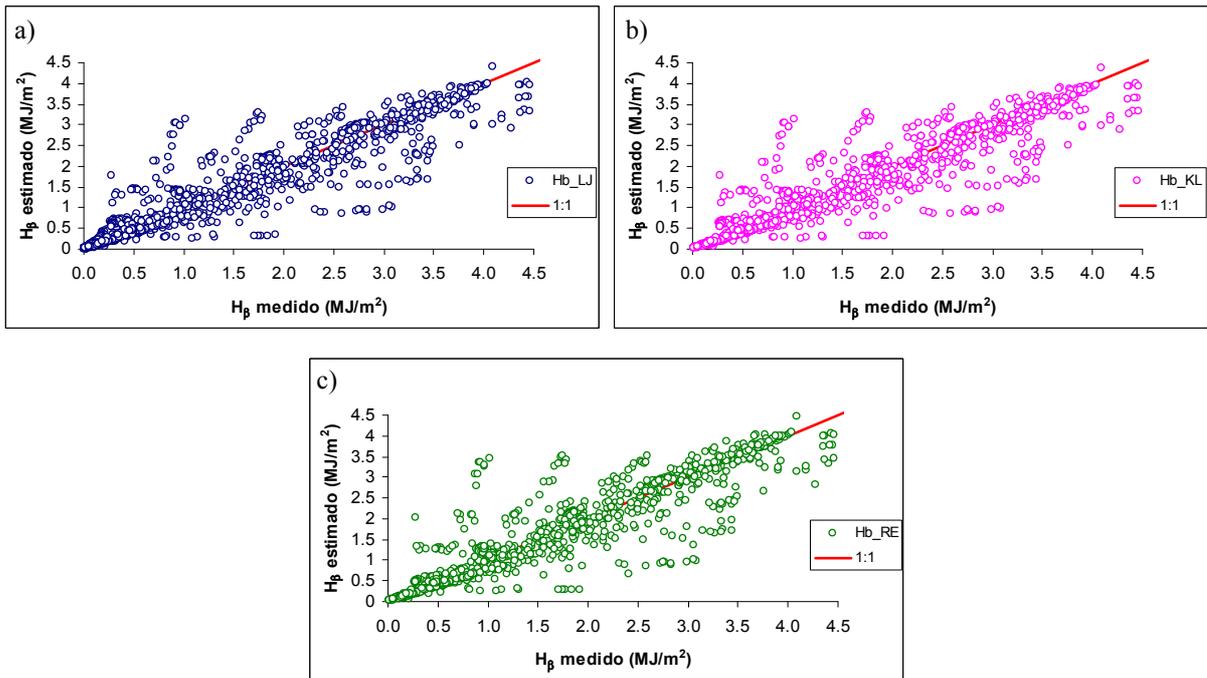
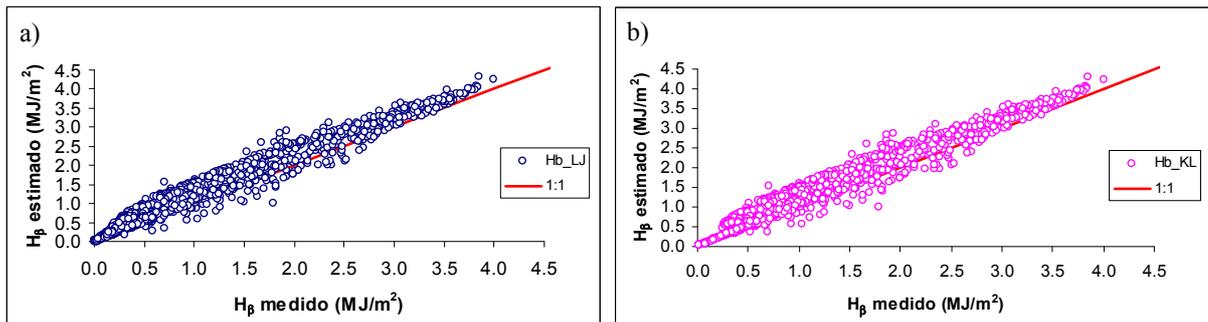


Figura 8: irradiación solar global estimada vs. medida en un plano inclinado 45° orientado al NO en Luján con el modelo de: a) Liu y Jordan (1961), b) Klucher (1979) y c) Reindl (1990).



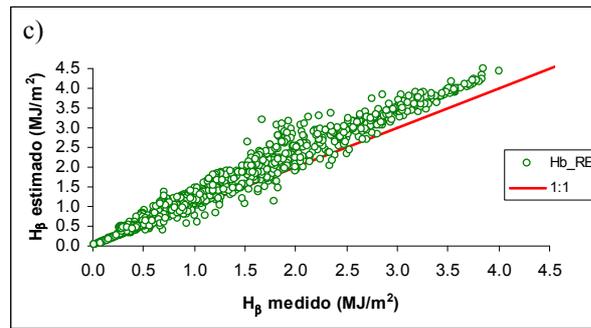


Figura 9: irradiación solar global estimada vs. medida en un plano inclinado 45° orientado al O en Luján con el modelo de: a) Liu y Jordan (1961), b) Klucher (1979) y c) Reindl (1990).

orientación del plano	pendiente de la recta de ajuste	R ²	RMSE	MBE	N
45° E					
Liu y Jordan	0.798	0.912	33.1 %	-15.3 %	1325
Klucher	0.817	0.931	30.0 %	-13.6 %	1325
Reindl	0.790	0.953	31.4 %	-19.0 %	1325
45° NE					
Liu y Jordan	0.872	0.896	29.0 %	-9.0 %	1219
Klucher	0.891	0.899	27.8 %	-6.9 %	1219
Reindl	0.871	0.901	28.9 %	-10.2 %	1219
45° NO					
Liu y Jordan	0.944	0.861	30.9 %	-2.2 %	1223
Klucher	0.933	0.838	30.8 %	-3.5 %	1223
Reindl	0.961	0.843	30.9 %	-1.4 %	1223
45° O					
Liu y Jordan	1.119	0.959	25.4 %	16.4 %	1322
Klucher	1.104	0.944	25.9 %	8.4 %	1322
Reindl	1.162	0.961	25.9 %	11.9 %	1322

Tabla 1: Valores de los estimadores estadísticos calculados para analizar el comportamiento de los modelos de Liu y Jordan, Klucher y Reindl en un plano inclinado 45° con diferentes orientaciones.

Los errores obtenidos tanto con el modelo isotrópico de Liu y Jordan, como con los anisotrópicos de Klucher y Reindl superan en todos los casos el 25%. Todos los modelos tienden a subestimar los valores medidos, salvo en el caso del plano orientado al Oeste donde los tres modelos tienden a sobreestimar.

Teniendo en cuenta los estimadores mostrados en la Tabla 1, podemos decir que el modelo de Klucher presentó los menores MBE%, pero en los RMSE% no se encontraron diferencias. Todos los modelos obtuvieron los menores errores al estimar la irradiación incidente en el plano orientado al Oeste.

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el comportamiento de tres modelos utilizados con frecuencia para estimar la irradiación solar global incidente en plano inclinado, el isotrópico de Liu y Jordan y los anisotrópicos de Klucher y Reindl. Se estimó la irradiación incidente en 4 planos inclinados 45° y orientados al Este, Noreste, Noroeste y Oeste. El modelo que mejores resultados arrojó fue el de Klucher, con un RMSE del 30 % y una subestimación del 13.6 % para estimar la irradiación incidente sobre el plano orientado al Este. Para los planos orientados al Noreste la subestimación baja al 6.9 %, y el error fue

del 28 %; para el plano orientado al Noroeste la subestimación fue del 3.5 %, y el RMSE del 31%. En el caso del plano orientado al Oeste, el modelo pasa a sobreestimar en un 8 % y el error fue del 26 %. De todas maneras estos errores no son significativamente diferentes de los obtenidos con los otros modelos, motivo por el cual consideramos necesario realizar a futuro un análisis en función de las diferentes condiciones de cielo y de la altura solar, de manera de poder determinar cuál es el modelo que mejor aproxima a los valores medidos para cada caso.

NOMENCLATURA

θ = ángulo de incidencia sobre la superficie. Angulo entre una línea normal al plano inclinado y una línea dirigida hacia el Sol.

θ_z = ángulo cenital. Angulo entre una línea vertical al cenit y una línea dirigida hacia el Sol.

δ = declinación solar

φ = latitud

β = ángulo de inclinación del plano receptor

γ = ángulo acimutal del plano receptor

ω = ángulo horario

ρ = albedo

H = irradiación solar global incidente en el plano horizontal

H_d = irradiación solar difusa incidente en el plano horizontal

H_b = irradiación solar directa incidente en el plano horizontal

H_0 = irradiación sobre plano horizontal a tope de atmósfera

H_β = irradiación solar global incidente en un plano inclinado un ángulo β .

$H_{\beta d}$ = irradiación solar difusa incidente en un plano inclinado un ángulo β .

$H_{\beta b}$ = irradiación solar directa incidente en un plano inclinado un ángulo β .

K_T = índice de claridad

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.
- Denegri M.J. (2015). Comparación de modelos empíricos de estimación de la radiación solar global en plano inclinado. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 3, pp. 11.23-11.29,
- 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.
- Gueymard, C. (1987). An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy* 38, 5, 367-386.
- 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 orientatios: 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 área. *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).
- 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.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J.J. y Stewart, R. (1990). Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44, 271-289.
- 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).

ESTIMATION OF HOURLY GLOBAL RADIATION ON TILTED AND ORIENTED SURFACES IN LUJÁN

ABSTRACT: The aim of this study is to compare the behavior of three models used to estimate the global solar radiation incident on the inclined plane frequently, the isotropic model of Liu and Jordan and the anisotropic models of Klucher and Reindl. The irradiation incident at four planes tilted 45° and oriented to the East, Northeast, Northwest and West was estimated. These estimatives were then compared versus measured values obtained in the radiometric station of the Universidad Nacional de Luján. Different statistical parameters were estimated to determine which model performed better. All models underestimated the measured values. The Klucher model was the best, but its errors reaching 30%, 28%, 31% and 26% when estimating the incident irradiation in a plane facing E, NE, NO and O, respectively.

Keywords: Decomposition models, azimuthal variation plane.