

## CARTAS PRELIMINARES DE IRRADIACIÓN DIRECTA PARA ARGENTINA

C. Raichijk, H. Grossi Gallegos\*, R. Righini  
GERSolar, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, (6700) Luján,  
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

**RESUMEN:** En este trabajo se presentan para Argentina cartas preliminares de los valores medios mensuales de irradiación directa sobre plano horizontal y de irradiación directa normal, obtenidos mediante la aplicación de correlaciones empíricas de descomposición a partir de cartas de irradiación global media mensual publicadas en trabajos anteriores. Se generan también cartas similares utilizando valores medios mensuales de la irradiación directa publicados en la página de NASA, ASDC/SSE DATA SET. Se calculan para todo el país y para cada mes el desvío cuadrático medio relativo, RMSE%, y el sesgo medio relativo, MBE%, comparando los valores obtenidos en este trabajo y los publicados por NASA, hallándose para Enero desvíos relativos de 30-31% y de 38-39% para Julio. Estos valores significativamente altos recalcan la necesidad de contar en un futuro con registros sistemáticos de datos en tierra de la componente directa de la irradiación solar incidente, lo que permitiría no solo validar cualquier método de estimación del parámetro sino también evaluar el rendimiento potencial de distintas aplicaciones con concentradores.

**Palabras clave:** irradiación directa, métodos de descomposición, cartas preliminares.

### INTRODUCCIÓN

La irradiación directa es un parámetro esencial para la evaluación del rendimiento de cualquier sistema aplicado con colectores concentradores, como pueden ser las llamadas plantas solares térmicas de potencia cuyo desarrollo y perspectivas de implementación han crecido en los últimos años. A su vez, la confección de cartas con la distribución espacial de dicho parámetro posibilitaría evaluar para distintas regiones el potencial tanto técnico como económico de una futura instalación. Sin embargo mediciones sistemáticas en tierra de irradiación directa son en general poco frecuentes (prácticamente inexistentes en nuestro país) debido a problemas de mantenimiento y al alto costo de los sistemas de medición, lo que impone la necesidad de estimar la irradiación directa mediante modelos que relacionen este parámetro con otras variables atmosféricas y meteorológicas disponibles.

Existen básicamente dos tipos de modelos para estimar la componente directa, modelos de transferencia radiativa y modelos de descomposición. Dentro del primer grupo cabe destacar los distintos modelos parametrizados de banda ancha bajo condiciones de cielo claro (Gueymard, 2003), que estiman la componente directa en superficie teniendo en cuenta los procesos de atenuación atmosférica de la irradiación extraterrestre incidente como son la dispersión en moléculas de aire, vapor y aerosoles y la absorción debida a ozono, contenido de agua y dióxido de carbono entre otros elementos. Los modelos de descomposición estiman mediante correlaciones empíricas la componente directa a partir de valores disponibles de irradiación global.

Broesamble *et al.* (2001) desarrollaron una herramienta de evaluación, denominada STEPS, que permite simular el funcionamiento de una planta solar térmica estimando con alta resolución para amplias regiones el rendimiento potencial de generación eléctrica y el costo por kWh generado que tendría localmente dicho emprendimiento. Entre otros productos, pero como principal parámetro de cálculo, se generan mapas de irradiación directa normal con una resolución espacial de  $5 \times 5 \text{ km}^2$  para valores medios horarios. Para ello se aplica el modelo de banda ancha de cielo claro de Bird (1984) modificado por un coeficiente de transmisión de nube. Como datos de entrada de este modelo se toman valores satelitales de espesor óptico de aerosol, vapor de agua y ozono y para la corrección por presión de la aeromasa datos georeferenciados de altura. La evaluación de la atenuación debido a la presencia de nubes se realiza analizando valores de los canales infrarrojo y visible del satélite meteorológico METEOSAT, los que permiten establecer umbrales para la condición libre de nubes y completamente nublado y definir luego por interpolación lineal el índice de nubosidad para cada pixel y cada día.

Siguiendo la misma metodología se han confeccionado cartas de irradiación directa normal para 13 países de América Latina, África y Asia dentro del marco del Proyecto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) bajo el auspicio de UNEP (United Nations Environment Programme) como se expone en Schillings *et al.* (2002), siendo Brasil el único país participante de América del Sur. Como antecedente en el empleo de modelos de descomposición para estimar la componente directa, tanto normal como sobre plano horizontal, a partir de valores medidos o estimados de irradiación global se encuentra el trabajo de Estrada-Cajigal Ramírez *et al.* (2005) para la República de México.

En el presente trabajo y en forma preliminar, debido básicamente a la ausencia de datos de tierra que permitan validar los resultados obtenidos, se confeccionan cartas de los valores medios mensuales de irradiación directa sobre plano horizontal y de irradiación directa normal para la República Argentina mediante modelos de descomposición a partir

de cartas de irradiación global media mensual para los distintos meses del año presentados en trabajos anteriores (Righini *et al.* 2004, 2005). Por otro lado se generan las mismas cartas a partir de valores publicados por NASA en su página ASDC/SSE (Atmospheric Science Data Center/Surface meteorology and Solar Energy data set). Con el objeto de comparar los valores preliminares estimados en este trabajo con valores de libre acceso publicados por NASA se calculan el desvío cuadrático medio relativo, RMSE%, y el sesgo medio relativo, MBE%, entre estos valores en todo el territorio y para cada mes del año.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para estimar la componente directa a partir de valores medios de irradiación global se emplean distintas correlaciones empíricas. En primer lugar se estima la fracción difusa diaria media mensual mediante la correlación propuesta por Page (1961):

$$\overline{H_d}/\overline{H} = 1,00 - 1,13 \overline{K_t} \quad (1)$$

siendo  $\overline{H_d}$  la irradiación difusa diaria media mensual,  $\overline{H}$  la irradiación global diaria media mensual sobre plano horizontal y  $\overline{K_t} = \overline{H}/\overline{H_0}$  el índice de claridad medio mensual. Page consideró los promedios mensuales de irradiación solar global y difusa medidos durante períodos de diferente extensión (de 12 a 60 meses) en 10 estaciones ubicadas a diferentes alturas (de 5 a 1700 m s.n.m.), bajo condiciones climáticas diversas entre las latitudes 40° N y 40° S, y estableció para cada una de ellas una relación lineal entre los promedios de la fracción de irradiación difusa a global en función del promedio del índice de claridad, siendo una de las dificultades a solucionar en el trabajo el saber si se había aplicado correctamente la corrección por banda sombreadora. Los valores obtenidos para la pendiente iban de -0,95 a -1,43, mientras que los de la ordenada al origen variaban entre 0,72 y 1,20. En Argentina, se determinaron para Ushuaia los valores 0,85 y -0,74 (Grossi Gallegos *et al.*, 2006) y para San Miguel, 1,36 y -1,11 (Grossi Gallegos *et al.*, 2003). Sin embargo, un trabajo de Ma e Iqbal (1984) determinó que la correlación de Page era la más simple y a la vez, precisa. Algo similar verificó Bashahu (2003) en Dakar.

A partir de (1) se estima la componente directa sobre plano horizontal:

$$\overline{H_b} = \overline{H} - \overline{H_d} \quad (2)$$

Luego, con el objeto de estimar la irradiación directa normal, se aplican en primera instancia las correlaciones establecidas por Collares-Pereira y Rabl (1979) para obtener los valores medios de la irradiación global horaria  $\overline{h}$  y su componente difusa  $\overline{h_d}$ , ambas sobre plano horizontal:

$$\overline{h}/\overline{H} = (\pi/24)(a + b \cos \omega) \left( \cos \omega - \cos \overline{\omega_s} \right) / \left[ \sin \overline{\omega_s} \left( \pi \overline{\omega_s} / 180^\circ \right) \cos \overline{\omega_s} \right] \quad (3)$$

en donde  $\overline{\omega_s}$  es el valor medio mensual del ángulo horario de salida del sol,  $\omega$  el ángulo horario del centro del intervalo horario medido respecto al mediodía solar, ambos medidos en grados, y:

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin \left( \overline{\omega_s} - 60^\circ \right) \quad (4)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin \left( \overline{\omega_s} - 60^\circ \right) \quad (5)$$

Para la componente difusa se plantea (Collares-Pereira y Rabl, 1979):

$$\overline{h_d}/\overline{H_d} = (\pi/24) \left( \cos \omega - \cos \overline{\omega_s} \right) / \left[ \sin \overline{\omega_s} - \left( \pi \overline{\omega_s} / 180^\circ \right) \cos \overline{\omega_s} \right] \quad (6)$$

Conociendo los valores medios horarios de la irradiación global y difusa se determinan por diferencia los valores medios horarios de la componente directa sobre plano horizontal. Estos se proyectan a un plano perpendicular a la irradiación incidente para finalmente integrarlos a lo largo del día central de cada mes y obtener así los valores medios mensuales de la irradiación directa normal.

Como dato de entrada del modelo se utilizaron las cartas de valores diarios medios mensuales de la irradiación global para Argentina publicadas en trabajos anteriores (Righini *et al.*, 2004, 2005). En dicha oportunidad se obtuvieron

primero, en un número restringido de estaciones en las que se midieron simultáneamente las horas de brillo solar y la irradiación global diarias, las constantes de la ecuación de Ångström-Prescott para cada mes. Utilizando el método de kriging se trazaron las curvas de distribución espacial de dichas constantes para todo el país. Luego, teniendo en cuenta los datos de horas de brillo solar registrados en un elevado número de estaciones, se obtuvieron por el método de interpolación antes mencionado las cartas con la distribución de las horas relativas de brillo solar; se operó sobre ellas con la ya citada ecuación lineal, estimándose así los valores medios mensuales de la irradiación solar global diaria para todo el territorio.

En este trabajo, para cada punto de la grilla de valores obtenida en las cartas antes mencionadas se aplicaron primero las correlaciones (1) y (2) obteniendo de esta manera los valores diarios medios mensuales de la componente directa sobre plano horizontal. Luego, mediante las correlaciones (3-6), y tal como se explicó con anterioridad, se obtuvieron los valores diarios medios mensuales de la irradiación directa normal en cada punto; finalmente, empleando kriging se generaron las cartas para todo el país.

Por otra parte, a partir de valores diarios medios mensuales de irradiación solar global, difusa y directa normal de libre acceso publicados por NASA se generaron para Argentina, por un lado, cartas de la componente directa sobre plano horizontal aplicando la expresión (2); y por otro, cartas de irradiación directa normal.

Se determinaron para todo el territorio y cada mes el desvío cuadrático medio relativo porcentual, RMSE%, y el sesgo medio relativo porcentual, MBE%, entre los valores obtenidos en este trabajo y los publicados por NASA, mediante las siguientes expresiones, siendo n el número de puntos de la grilla con valores correspondientes para cada mes:

$$RMSE\% = \frac{\left( \frac{\sum \left( \overline{H_{est}} - \overline{H_{NASA}} \right)^2}{n} \right)^{1/2}}{\left( \frac{\sum \overline{H_{est}}}{n} \right)} 100\% \quad (7)$$

$$MBE\% = \frac{\sum \left( \overline{H_{est}} - \overline{H_{NASA}} \right)}{\sum \overline{H_{est}}} 100\% \quad (8)$$

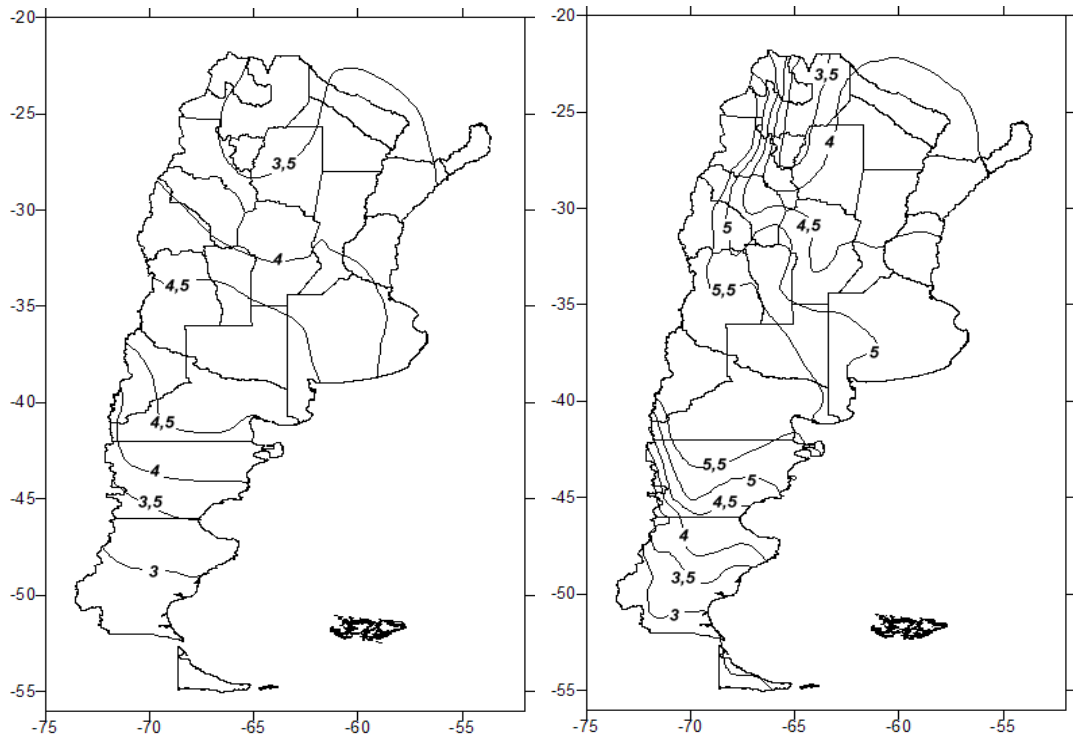
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un análisis de regresión practicado entre los valores medios mensuales estimados SSE (Surface meteorology and Solar Energy data set ) versus los de la BSRN (Baseline Surface Radiation Network) para el período que va de Julio de 1983 a Junio de 2006 le permite afirmar a la NASA que los mismos, para la irradiación directa normal, presentan un RMSE% de 20,93% y un MBE% de 2,40% para la zona de cobertura comprendida entre los 60° S y el ecuador, evaluados sobre todos los meses del año, mientras que para las estimaciones de la irradiación global dan valores de RMSE% de 8,71% y de MBE% de 0,29%.

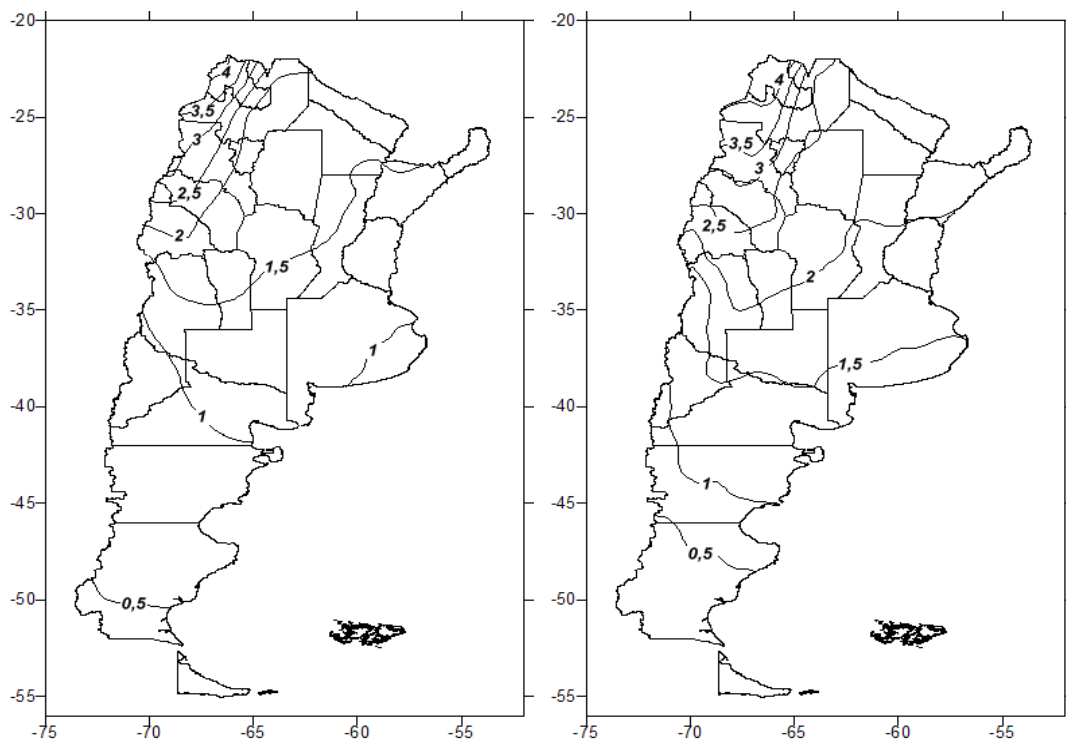
Vale la pena recordar que el objetivo de la BSRN es proveer observaciones de los flujos de irradiación solar de ondas corta y larga en superficie de la mejor calidad posible; estas lecturas se toman en un pequeño número de estaciones selectas (35 operativas actualmente), ubicadas en zonas climáticas contrastantes, permitiendo así la validación y evaluación de las estimaciones satelitales.

Si se comparan los valores medios mensuales de irradiación global obtenidos en trabajos anteriores (Righini *et al.*, 2004, 2005) con las estimaciones publicadas por NASA se obtienen valores de RMSE% y MBE% de 14% y -9% para Enero y de 14% y -10% para Julio, manifestando una sobrevaloración por parte de los datos de NASA respecto de los estimados en los trabajos citados.

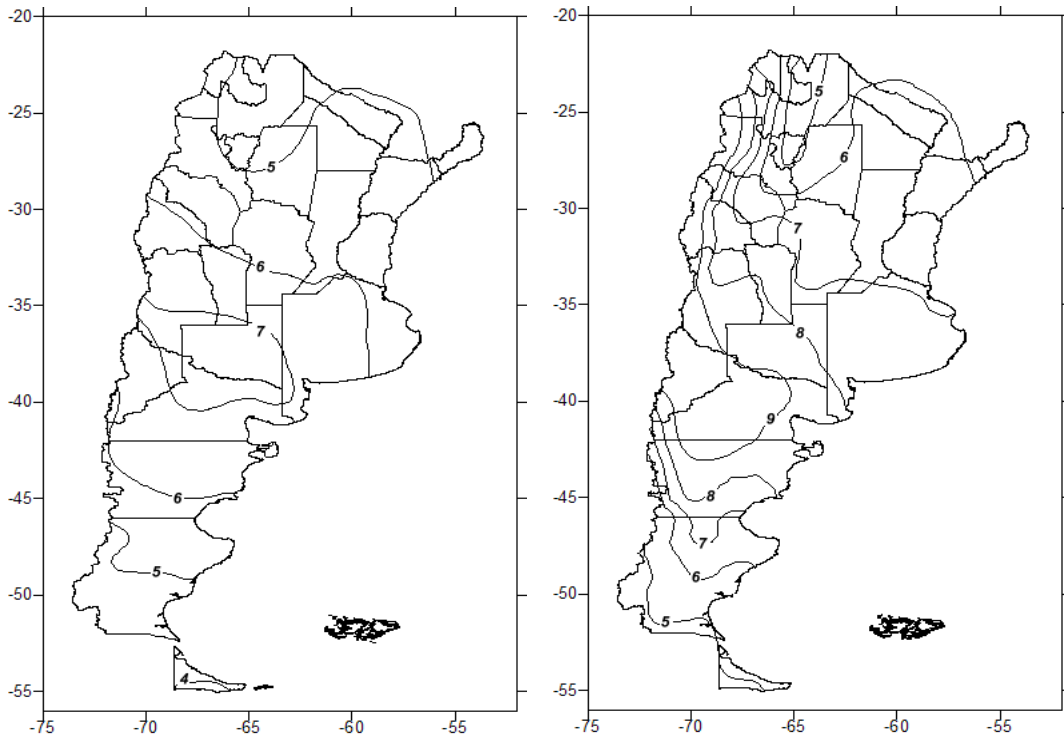
Se presentan en las siguientes figuras los mapas trazados con datos estimados para Argentina, comparándolos con los obtenidos con los datos de NASA.



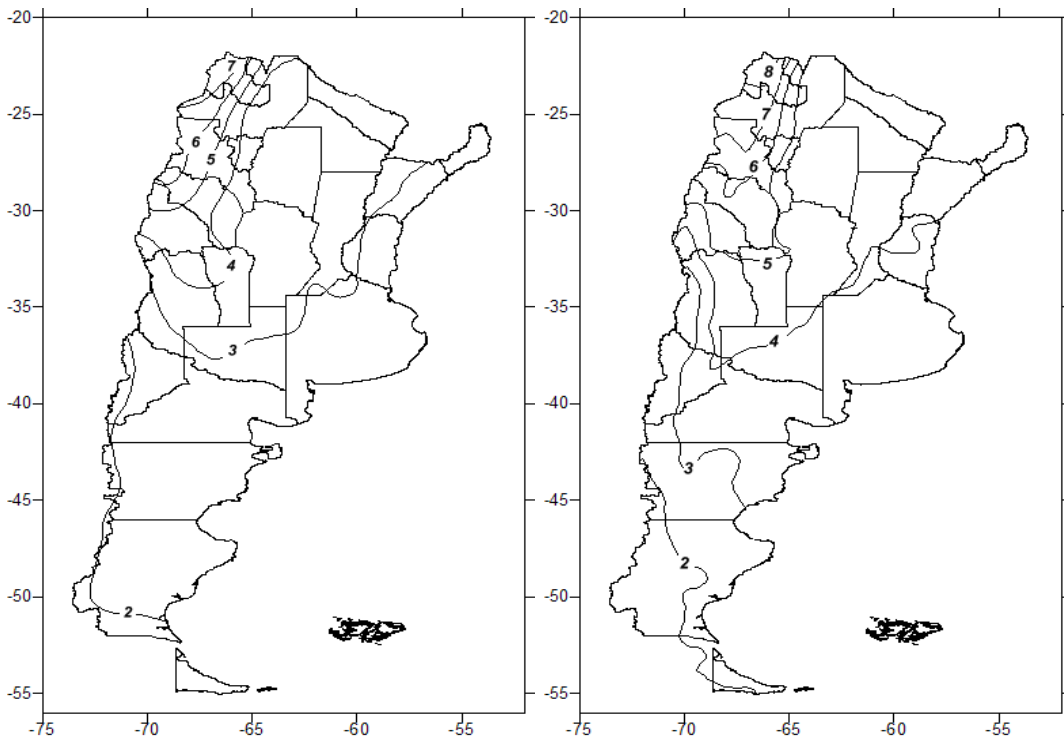
**Figura 1.** Distribución espacial de los valores diarios medios mensuales de la componente directa sobre plano horizontal correspondientes a Enero estimados en este trabajo (izq.) y utilizando valores publicados por NASA (der.), expresados en kWh/m<sup>2</sup>.



**Figura 2.** Distribución espacial de los valores diarios medios mensuales de la componente directa sobre plano horizontal correspondientes a Julio estimados en este trabajo (izq.) y utilizando valores publicados por NASA (der.), expresados en kWh/m<sup>2</sup>.



**Figura 3.** Distribución espacial de los valores diarios medios mensuales de la irradiación directa normal correspondientes a Enero estimados en este trabajo (izq.) y utilizando valores publicados por NASA (der.), expresados en kWh/m<sup>2</sup>.



**Figura 4.** Distribución espacial de los valores diarios medios mensuales de la irradiación directa normal correspondientes a Julio estimados en este trabajo (izq.) y utilizando valores publicados por NASA (der.), expresados en kWh/m<sup>2</sup>.

Observando las Figuras 1 y 2 por un lado y las Figuras 3 y 4 por otro se advierte en general una aceptable correspondencia entre las isóneas trazadas, tanto para Enero como para Julio, pero no para los valores de las

mismas. Al comparar las cartas de la componente directa sobre plano horizontal se obtuvieron valores de RMSE% y MBE% de 30% y -21% para Enero y de 38% y -28% para Julio, mientras que para las cartas de irradiación directa normal resultaron de 31% y -22% para Enero y de 39% y -29% para Julio, indicando siempre una sobrevaloración importante por parte de los valores publicados por NASA.

El aumento en los desvíos respecto a los valores obtenidos al comparar las estimaciones de la irradiación global se puede explicar basándose en la baja precisión con que han sido determinadas las correlaciones empíricas utilizadas en este trabajo. A manera de ejemplo se presenta en la Figura 5 la distribución de valores hallada en Ushuaia al tratar de correlacionar linealmente, como propone Page en (1), la fracción difusa diaria media mensual con el correspondiente índice de claridad.

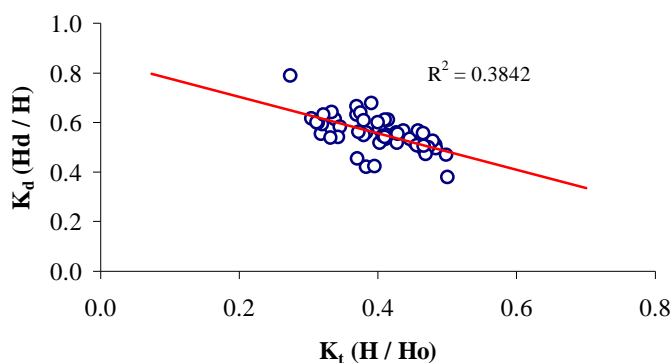


Figura 5. Correlación lineal entre la fracción difusa diaria media mensual con el promedio del índice de claridad, según Grossi Gallegos et al. (2006).

## CONCLUSIONES

Se generaron para Argentina cartas preliminares de valores diarios medios mensuales de irradiación directa sobre plano horizontal y de irradiación directa normal a partir de otras elaboradas anteriormente con la distribución de los promedios mensuales de la irradiación solar global recibida sobre plano horizontal. Los mismos, si bien no pueden ser validados ya que se carece de datos en tierra del parámetro, permiten identificar en primera instancia zonas de interés para posibles aplicaciones con concentradores dado los elevados valores obtenidos. Al comparar los valores estimados en este trabajo con los de libre acceso publicados por NASA se observan significativas diferencias. Esto no hace más que recalcar la necesidad de realizar campañas de medición de la componente directa en el país lo que permitiría un mejor conocimiento del recurso energético en vista de futuras aplicaciones y la posibilidad de validar cualquier estimación que se haga del parámetro.

## REFERENCIAS

- Bashahu, M. (2003) Statistical comparison of models for estimating the monthly average daily diffuse radiation at a subtropical African site. *Solar Energy* **75**, 43-51.
- Bird R. E. (1984) A simple solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiation. *Solar Energy* **32** 4, 461-471.
- Broesamle H., Mannstein H., Schillings C., Trieb F. (2001) Assessment of solar electricity potentials in North Africa based on satellite data and a geographic information system. *Solar Energy* **70**, 1, 1-12.
- Collares-Pereira M. and Rabl A. (1979) The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* **22**, 2, 155-164.
- Estrada-Cajigal Ramírez V., Almanza Salgado R. (2005) Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. Disponible en <http://www.solartronic.com/download/radiacion.pdf>
- Grossi Gallegos H., Roberti A., Renzini G. y Sierra V. (2003) Algunos comentarios sobre el modelo de Suehrcke y su aplicación en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **7**, 2, 11.01-11.05 versión CD-ROM..
- Grossi Gallegos H., Roberti A. y Sierra V. (2006) Análisis de los datos de irradiación solar disponibles en Ushuaia, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **10**, 11.09-11.14 versión CD-ROM.
- Gueymard C. (2003) Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* **74**, 5, 355-379.
- Ma, C. C. Y. and Iqbal, M. (1984) Statistical comparison of solar radiation correlations – Monthly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces. *Solar Energy* **33**, 2, 143-148.

- NASA/ASDC-Atmospheric Science Data Center/SSE -Surface meteorology and Solar Energy data set. Disponible en [http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/global/text/direct\\_radiation](http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/global/text/direct_radiation).
- Page, J.K. (1961) The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. In *Proc. U.N. Conf. on New Sources of Energy, Paper No. S98* vol. 4, pp. 378-390.
- Righini R., Grossi Gallegos H. y Raichijk C. (2004) Trazado de nuevas cartas de irradiación solar global para Argentina a partir de horas de brillo solar (heliofanía). *Energías Renovables y Medio Ambiente* **14**, 23-31.
- Righini R., Grossi Gallegos H. and Raichijk C. (2005) Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy* **30**, 1241-1255.
- Schillings C., Pereira E. B., Perez R., Meyer R., Trieb F. and Renné D. (2002) High resolution solar energy resource assessment within the UNEP-Project SWERA. *Proc. of World Renewable Energy Congress VII*, Cologne, Germany, 1-5.

## ABSTRACT

In this work, preliminary charts of mean monthly values of direct radiation on horizontal plane and normal direct radiation are presented for Argentina, obtained by means of the application of empirical correlations of decomposition from previous published charts of mean monthly global radiation. Similar charts are generated using mean monthly values of direct radiation published by NASA in ASDC/SSE DATA SET. For all the country and for every month Relative Mean Square Error, RMSE, and Mean Bias Error, MBE, between the values obtained in this work and published by NASA are calculated, finding for January the relative deflections of 30-31% and 38-39% for July. These high significant values stress the necessity for counting in the future on systematic records of surface data of the direct component of the incident solar radiation, which would allow not only to validate any method of estimation of the parameter but also to evaluate the potential yield of different applications with concentrators.

**Key words:** direct radiation, decomposition models, preliminary charts.