

## EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA ESTIMACIÓN DE VALORES MEDIOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN GLOBAL EN ARGENTINA

C. Raichijk, H. Grossi Gallegos<sup>(1)</sup> y R. Righini

GERSolar, División Física, Departamento Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-2323) 440241 o 423171 int. 270

E-mail: craichijk@mail.unlu.edu.ar

**RESUMEN:** La carencia de datos de radiación suficientes en cantidad y calidad es bastante generalizada (a nivel mundial, aproximadamente en una de cada 500 estaciones meteorológicas se realizan observaciones de radiación solar incidente); por esta razón, tanto en el campo del aprovechamiento energético cuanto en otros del campo de la Agrometeorología se recurre con frecuencia a métodos alternativos de estimación. Se evalúa en este caso un método de estimación de los promedios mensuales de la irradiación solar global diaria a partir de los promedios mensuales de la amplitud térmica diaria y se concluye que su utilización constituye una alternativa razonable asociada a incertezas del orden de las más difundidas.

**Palabras clave:** irradiación, distribución espacial, estimación, amplitud térmica, Argentina.

### 1. INTRODUCCION

La problemática de la carencia de datos de radiación suficientes en cantidad y calidad es bastante generalizada (a nivel mundial, aproximadamente en una de cada 500 estaciones meteorológicas se realizan observaciones de radiación solar incidente) y se hace evidente también en otros campos distintos al de su aprovechamiento energético, como por ejemplo, la aplicación de modelos que simulan procesos de fotosíntesis o evapotranspiración.

Dado que el número de estaciones de medición de la radiación solar global que opera el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se ha visto reducido drásticamente en los últimos años por problemas de financiamiento que dificultaron su mantenimiento en operación, se ha recurrido a métodos alternativos para tratar de obtener cartas que reflejen la distribución espacio temporal de la irradiación solar basadas en otras variables meteorológicas relacionadas con la ella, que presenten registros con una extensión temporal que los haga confiables estadísticamente y que ofrezcan productos que puedan ser comparados con los datos de tierra utilizados en las cartas de Grossi Gallegos (1998a y b). Así fue como este Grupo presentó recientemente (Righini *et al.*, 2005) un conjunto de cartas elaborado a partir de la conocida relación establecida entre el índice de claridad  $K_t$  y la heliofanía relativa.

Los resultados hallados mostraron la razonabilidad del uso de los métodos de interpolación espacial como los empleados para posibilitar, con unas pocas estaciones que presenten una adecuada distribución espacial y en donde se hubiesen determinado localmente los coeficientes de Ångström-Prescott a partir de mediciones simultáneas de horas de brillo solar e irradiación global, la determinación de los mismos en una zona muy extensa y, sobre la base de ellos, el cálculo de los promedios mensuales de irradiación global diaria recibida en un plano horizontal a nivel del suelo, obteniendo una idea preliminar de la distribución del recurso solar con un error estimado del orden del 10 %.

A lo largo del tiempo se presentaron otros métodos alternativos que utilizan las variables meteorológicas medidas más corrientemente, como es el caso de las temperaturas máxima y mínima del aire. Al respecto, cabe mencionar la expresión desarrollada por Bristow y Campbell (1984, citada por Baigorria *et al.*, 2004), que toma la forma:

$$\frac{\overline{H}}{H_0} = a \left\{ 1 - \exp \left[ -b \left( T_{max} - T_{min} \right)^c \right] \right\} \quad (1)$$

en donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes empíricas, y que fuera utilizada recientemente para estimar los promedios de irradiación solar que completaron la base de datos utilizada para elaborar el Atlas de Energía Solar del Perú (SENAMHI/MEM, 2003); y la desarrollada por Hargreaves *et al.* (1985, citado por Alonso *et al.*, 2002), que es una expresión lineal de la raíz cuadrada del promedio de la amplitud térmica diaria:

$$\frac{\overline{H}}{H_0} = a + b \left( T_{max} - T_{min} \right)^{1/2} \quad (2)$$

---

<sup>1</sup> Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

Siguiendo esta línea, Alonso *et al.* (2002) elaboraron localmente un modelo para estimar la irradiación solar global diaria utilizando la amplitud térmica y la precipitación, ajustando los coeficientes con datos de 15 estaciones de la Red Solarimétrica de Argentina y comparando los resultados de la estimación.

Por otra parte, Flores Larsen y Lesino (1999) utilizaron una expresión lineal para obtener una relación inversa con la cual estimaron la amplitud térmica para la ciudad de Salta a partir del índice de claridad, siguiendo una propuesta de Erbs *et al.* (1983, citada por estos autores).

Lo que se plantea en este trabajo es evaluar el ajuste que se puede lograr al estimar los promedios mensuales de la irradiación solar global diaria a partir de los correspondientes promedios de la amplitud térmica diaria, determinando luego por métodos de interpolación lineal la distribución del recurso solar en Argentina.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

Se estiman los promedios mensuales de irradiación solar global diaria para todo el país a partir del modelo propuesto por Hargreaves *et al.* como función lineal de la raíz cuadrada de los promedios de la amplitud térmica diaria. Para ello se determina por métodos geoestadísticos de interpolación (kriging) la distribución espacial de las constantes  $a$  y  $b$  de dicha correlación utilizando valores obtenidos localmente en distintas estaciones en las cuales se cuenta con datos simultáneos de irradiación solar global y amplitud térmica diaria.

Con información suministrada por la Red Solarimétrica y por el Servicio Meteorológico Nacional para el período 1980-2000 se establecieron las constantes  $a$  y  $b$  para las siguientes estaciones: Balcarce, Alto Valle, Cerrillos, Cerro Azul, Paraná, Rafaela, Bariloche, El Sombrerito, Famaillá, Marcos Juárez, Presidencia Roque Sáenz Peña, Trelew y Ushuaia. Para la elección de las estaciones se consideró la máxima cobertura geográfica posible, considerando casos de distinta extensión temporal y grado de correlación.

Luego utilizando datos del Servicio Meteorológico Nacional de una serie de 106 estaciones con una extensión temporal de más de 30 años cada una, se obtuvieron por kriging las grillas de distribución espacial de los promedios mensuales de la amplitud térmica diaria para cada mes del año que, multiplicadas según propone la correlación estudiada, permiten elaborar los mapas de irradiación solar global diaria media mensual para todo el país. A su vez, y con el objeto de evaluar el nivel de ajuste de la metodología empleada, se cotejaron valores estimados con datos de superficie medidos en las siguientes estaciones reservadas a tal efecto: San Julián, Córdoba, La Rioja, San Miguel, Río Cuarto, San Juan, Colonia San Rosa, Rama Caída, San Carlos, Villa Ortúzar y Pilar (Provincia de Córdoba) pudiendo determinar así el error cuadrático medio (RMSE) y el error promedio (MBE) relativos para cada mes del año.

## 3. RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los valores de las constantes  $a$  y  $b$  obtenidos en las estaciones antes mencionadas junto al número de meses considerados y el coeficiente de correlación  $R$ ; en la Figura 1 se muestran dos ejemplos extremos del ajuste de la correlación, y en la Figura 2, a manera de ejemplo, los mapas de irradiación solar global diaria media mensual obtenidos para los meses de enero y julio.

Estación	Latitud [°]	Longitud [°]	$a$	$b$ [(°) <sup>-0.5</sup> ]	$R$	N° de meses Evaluados
Cerrillos	-24.90	-65.48	0.1283	0.0948	0.59	145
R. Sáenz Peña	-26.87	-60.45	0.0041	0.1403	0.68	52
Famaillá	-27.05	-65.42	0.0911	0.1056	0.65	81
El Sombrerito	-27.65	-58.76	0.0925	0.1325	0.52	70
Cerro Azul	-27.65	-55.43	0.1043	0.1156	0.42	172
Rafaela	-31.28	-61.55	-0.0899	0.1791	0.77	219
Paraná	-31.83	-60.52	0.0879	0.1376	0.56	263
Marcos Juárez	-32.68	-62.12	-0.1654	0.1924	0.75	85
Balcarce	-37.75	-58.17	-0.2067	0.2147	0.80	69
Alto Valle	-39.02	-67.67	-0.2803	0.2125	0.76	99
Bariloche	-41.13	-71.27	0.0828	0.1420	0.85	84
Trelew	-43.20	-65.27	-0.1886	0.1979	0.79	105
Ushuaia	-54.80	-68.32	0.2095	0.0733	0.50	67

Tabla 1. Valores de las constantes  $a$  y  $b$  de la correlación de Hargreaves para estaciones con datos simultáneos de promedios mensuales de irradiación solar global y amplitud térmica.

Para el error cuadrático medio relativo (RMSE) se observaron valores que varían desde 9 % en enero hasta 14,2 % en marzo con un promedio anual del 11 % , y para el sesgo relativo (MBE) desde -1,2 % en noviembre hasta -7,1 % en febrero con un

promedio anual de -3,7 %. Cabe consignar que en el trabajo de Righini *et al.* ya citado, siguiendo la misma metodología de evaluación de la correlación empleada, se obtuvo para la determinación de la irradiación solar global diaria a partir de la heliofanía relativa (correlación de Ångström-Prescott) valores del RMSE que varían entre 6,9 % y 11,6 % con un promedio anual de 9,4 % y para el MBE entre -1,2 % y -6,9% con un promedio anual de -4%.

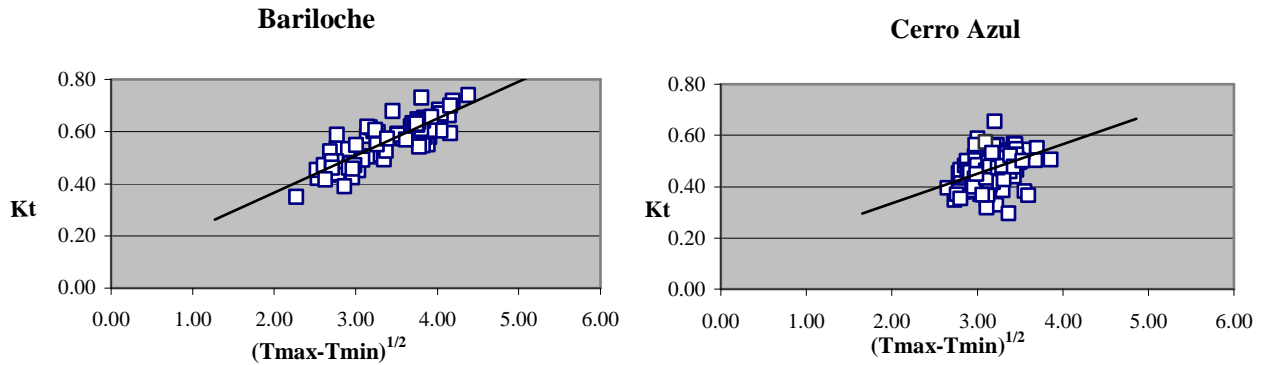


Figura 1. Ajuste de la correlación de Hargreaves para las estaciones de Bariloche ( $R=0.85$ ) y Cerro Azul ( $R=0.42$ ).

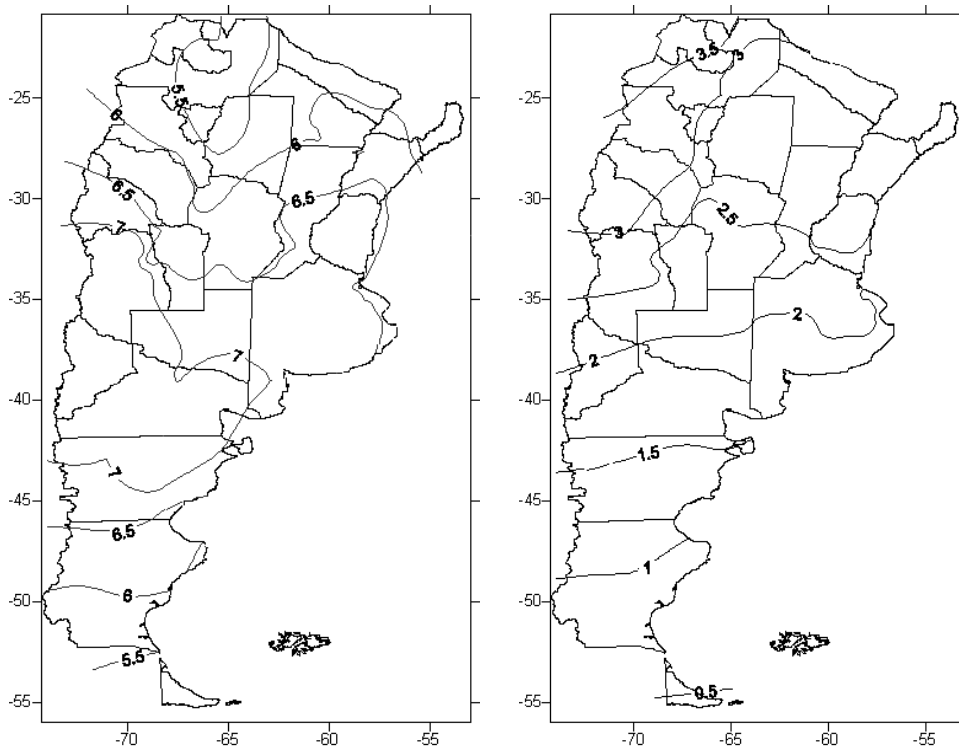


Figura 2. Distribución espacial del promedio mensual de la irradiación solar global diaria sobre un plano horizontal en Argentina en los meses de enero (izquierda) y julio (derecha) [ $\text{kWh/m}^2\text{-día}$ ].

Los mapas obtenidos muestran una buena concordancia con los anteriormente establecidos para Argentina, presentados tanto por Grossi Gallegos y como por Righini *et al.*; pueden observarse en verano los niveles de baja irradiación asociados con la cuña boscosa perteneciente a la selva tucumano-oranense, comparables a los del extremo sur del país, y la influencia de la Puna en la región Noroeste. En las regiones de frontera las isólinas son menos confiables ya que no se utilizaron valores de los países vecinos.

#### 4. CONCLUSIONES

Como puede verse del ajuste logrado con los datos de superficie, el método evaluado es una buena alternativa para la estimación de los valores medios de irradiación solar global y para conocer luego su distribución espacial. A pesar de que el ajuste obtenido en las correlaciones individuales no resultó bueno, tras aplicar la interpolación geoestadística los errores hallados son comparables a los otros métodos en uso, inclusive a los que utilizan información satelital: en este último caso los

promedios ofrecidos se basan en sólo 10 años y su representatividad climatológica es objetable, mientras que la incerteza de los resultados publicados va de 13 a 16%, de acuerdo con lo evaluado por sus responsables (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>). Por lo tanto, carecería de sentido pensar en estudiar la posible variación de los valores de las constantes con la época del año o con la altura.

Debe tenerse en cuenta sin embargo que, de acuerdo con los resultados del trabajo de Hoffmann *et al.* (1997) en el que compararon la década 1981/1990 con la 1941/1950 (esta última considerada como la globalmente más caliente entre 1900 y 1980), al norte de aproximadamente 42°S en Argentina los promedios anuales de las temperaturas máximas decrecieron mientras que los promedios de las mínimas aumentaron. Por lo tanto, las condiciones en las cuales fueron deducidas las correlaciones entre la amplitud térmica y transmisividad atmosférica (índice de claridad) van cambiando y los valores de irradiación solar que se estimen con ellos van a discrepar de los medidos actualmente; parte de la discrepancia observada también podría asignarse a esta variación ya que las constantes deducidas fueron luego utilizadas con promedios de amplitud térmica calculados a lo largo de tres décadas.

## REFERENCIAS

- Baigorria, G.M., Villegas, E.B., Trebejo, I., Carlos, J.F. and Quiroz, R. (2004) Atmospheric transmissivity: distribution and empirical estimation around the Central Andes. *Int. J. Climatol.* **24**, 1121-1136.
- Flores Larsen, S. y Lesino, G. (1999) Aplicación para la ciudad de Salta de un modelo de distribución horaria de temperatura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **3**, 2, 11.25-11.28.
- Grossi Gallegos H. (1998a) Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **4**, 119-123.
- Grossi Gallegos H. (1998b) Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **5**, 33-42.
- Hoffmann, J.A.J., Núñez, S.E. and Vargas, W.M. (1997) Temperature, humidity and precipitation variations in Argentina and the adjacent sub-antarctic region during the present century. *Meteorol. Zeitschrift* **6**, 3-11.
- 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.
- SENAMHI-MEM, "Atlas de Energía Solar del Perú. Proyecto PER/98/G31: Electrificación Rural en base de Energía Solar Fotovoltaica en el Perú", Lima, Perú, junio de 2003.

## ASSESSMENT OF AN ALTERNATIVE METHOD FOR ESTIMATING MONTHLY MEAN VALUES OF GLOBAL SOLAR IRRADIATION IN ARGENTINA

**ABSTRACT:** The shortage of solar irradiation measured data accurate enough to fulfill statistical conditions to be considered representative in time and space is a generalized problem (in the world, incident solar radiation measurements are taken near in 1 of 500 meteorological stations). Then, there are alternatives for estimating them for energy utilization and in Agrometeorology. In this paper a method for estimating global solar irradiation based on differences between maximum and minimum temperatures is evaluated, concluding that is a valid alternative giving uncertainties similar to those of more known models.

**Key words:** irradiation, spatial distribution, estimation, thermal amplitude, Argentina