



## EVALUACIÓN DE UNA APLICACIÓN ALTERNATIVA DE LA FÓRMULA DE SUEHRCKE EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

C. Raichijk, H. Grossi Gallegos\*

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:** Se evaluó una aplicación alternativa de la relación de Suehrcke en Argentina. Se usó un modelo de cielo claro, basado en una generalización de la ley de Beer-Lambert-Bouguer, un espesor óptico de Rayleigh integrado y una adaptación de los valores de aeromasa utilizados en el Atlas Europeo de Radiación Solar. El valor promedio del RMSE hallado en 20 estaciones de referencia fue de 4,1%. Este procedimiento, convirtiendo la gran base de datos de heliofanía existente en la región en irradiación global, puede expandir considerablemente esta información.

**Palabras clave:** irradiación, estimación, heliofanía, Suehrcke, Argentina.

### INTRODUCCIÓN

La necesidad de conocer la distribución espacial de los valores medios de la irradiación solar global en tierra y la escasez de mediciones directas de la misma dio origen a través del tiempo a la aparición de fórmulas de estimación que la correlacionaban con otras variables más fácilmente disponibles, como la heliofanía relativa, la nubosidad o la amplitud térmica, relaciones que permiten una aproximación razonable a este conocimiento (Grossi Gallegos *et al.*, 2005; Grossi Gallegos *et al.*, 2006).

Fue así como apareció el modelo establecido por Suehrcke (2000), cuya validez fue analizada a nivel internacional por Driesse y Thevenard (2002), en un trabajo que no incluyó para América del Sur datos de tierra ni de Argentina ni de Brasil, y localmente por Torres Deluigi y Fasulo (2002), Grossi Gallegos *et al.* (2003), Fasulo *et al.* (2006) y Grossi Gallegos *et al.* (2006).

Driesse y Thevenard (2002), utilizando para el índice de claridad de cielo claro el valor propuesto por el autor ( $K_c=0,70$ ) obtuvieron como resultado una dispersión apreciable en el ajuste de los valores estimados (12%), lo que permite concluir que la aproximación es equivalente a la obtenida con la correlación de Ångström-Prescott. Torres Deluigi y Fasulo (2002), ensayando con datos de irradiación obtenidos en San Luis durante los años 2000 y 2001, determinaron que el mejor ajuste en la estimación se logra con ese mismo valor. Grossi Gallegos *et al.* (2003) determinaron los promedios mensuales del mencionado valor a partir de promediar los índices de turbidez  $K_t$  en días claros registrados en 21 estaciones de la Red Solarimétrica, evaluando el ajuste para los meses de enero y julio y concluyendo que mejora el ajuste utilizando estos valores locales, los que se extienden entre 0,63 y 0,84.

Fasulo *et al.* (2006), en base al análisis de 5 años de datos, estimaron que el ajuste en San Luis mejora con un único valor de 0,68 dando lugar a un error cuadrático medio similar al obtenido con Ångström-Prescott y menor que otros modelos considerados. Finalmente, en el trabajo de Grossi Gallegos *et al.* (2006) analizaron los datos de Ushuaia y optimizaron el ajuste de la ecuación en base estacional (equinoccios, solsticios y anual), lo que dio lugar a diferentes valores del coeficiente.

En este trabajo se ensaya en veinte localidades de la República Argentina el método seguido por Tiba *et al.* (2005) en Brasil, quienes adaptaron el modelo utilizado en la elaboración del Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA) para determinar la irradiación de cielo claro y compararon luego, a partir del modelo de Suehrcke antes mencionado, la irradiación solar global estimada con valores de tierra.

### METODOLOGÍA

El modelo propuesto por Suehrcke para la estimación del valor medio mensual de la irradiación global diaria puede ser escrito como:

$$\frac{\bar{n}}{N} = \left( \frac{\bar{K}_t}{\bar{K}_c} \right)^2 \quad (1)$$

en donde  $\bar{K}_c = \bar{H}_c / \bar{H}_0$  es el índice medio de claridad de días claros,  $n$  el número de horas de brillo de Sol registradas en un heliógrafo de Campbell-Stokes (heliofanía efectiva) y  $N$  la duración teórica del día medida en horas.

\* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

Para estimar la irradiación solar con la relación propuesta por Suehrcke es necesario determinar previamente la irradiación de cielo claro  $H_c$ , que en los trabajos anteriores se lo supuso como una fracción de la irradiación extraterrestre ( $H_c=0,70 H_0$ , en el modelo más simple). Un modelo de cielo claro basado en el cálculo detallado de la interacción de la radiación solar con los componentes atmosféricos es complejo, basándose fundamentalmente en la ley de Beer; la expresión a que se hace referencia permite calcular la irradiancia directa sobre un plano horizontal en un día claro (atmósfera limpia y seca) como:

$$I_{bc} = \epsilon I_{cs} \text{ sen } \gamma_s \exp[-m T_L(\gamma_s) \delta_R(m)] \quad (2)$$

donde  $I_{bc}$  es la irradiancia solar directa de un día claro, proyectada sobre un plano horizontal,  $\epsilon$  es la corrección a la distancia media Sol-Tierra,  $I_{cs}$  es la constante solar ( $1367 \text{ W/m}^2$ ),  $\gamma_s$  es el ángulo de altura solar (complementario del ángulo cenital),  $m$  es la aeromasa óptica relativa (adimensional),  $T_L$  es el factor de turbidez de Linke (que expresa el número de atmósferas limpias y secas atravesadas por el rayo solar) y  $\delta_R(m)$  es el espesor óptico integral de Rayleigh (promediado sobre todas las longitudes de onda), que es función de la aeromasa.

En años recientes algunos investigadores han ampliado el concepto del espesor óptico de Rayleigh incluyendo la absorción de otros gases que ocurre naturalmente en una atmósfera limpia y seca, tales como dióxido de carbono, oxígeno y ciertos óxidos de nitrógeno. Esto lleva a aumentar el valor de referencia y, en consecuencia, a modificar los del factor de turbidez de Linke determinado a partir de mediciones de la irradiancia. Por tal motivo, a fin de rescatar las series históricas de medición de este factor y empalmarlas con los nuevos valores del espesor óptico estandarizado para aeromasa 2 (AM2) utilizados actualmente, se agrega un coeficiente que los modifica de la siguiente manera:

$$T_L = 0,8622 \cdot T_L(AM2) \quad (3)$$

Integrando a lo largo del día (o parte de él) la ecuación (2) modificada por la expresión (3) y teniendo en cuenta una cadena de algoritmos que describen la dependencia del espesor óptico con la aeromasa relativa, su variación con la altura del lugar y la corrección por refracción atmosférica, se obtiene una expresión que sólo depende del factor de turbidez de Linke para aeromasa 2,  $T_L(AM2)$ . Estos valores se completan con el cálculo de la componente difusa, siendo posible así determinar la irradiación global.

## DESARROLLO

El modelo a usar es el descrito antes y ya utilizado en la confección del Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA), tal como se presenta en Rigollier *et al.* (2000), incluyendo las correcciones propuestas posteriormente por Remund *et al.* (2003). Algunos valores típicos del factor de turbidez en Europa son: 2 para aire frío muy limpio, 4 a 6 para aire cálido húmedo, 3 para aire limpio cálido y mayor que 6 para aire contaminado, los que aumentan en verano y disminuyen en invierno.

Tiba *et al.* (2005) tomaron los valores del factor de turbidez para aeromasa 2,  $T_L(AM2)$ , para diferentes tipos de atmósfera adoptados en Europa y los modificaron simplemente pasando los de invierno del Hemisferio Norte al verano en el Hemisferio Sur y así correlativamente. El resultado obtenido se muestra en la Tabla 1.

Mes	Tipo de atmósfera			
	Muy claro	Claro	Urbano	Industrial
Enero	2,3	3,5	4,4	5,8
Febrero	2,3	3,3	4,3	5,7
Marzo	2,1	2,9	4,0	5,3
Abril	1,8	2,6	3,6	4,9
Mayo	1,6	2,3	3,3	4,5
Junio	1,5	2,2	3,1	4,2
Julio	1,5	2,1	3,1	4,1
Agosto	1,6	2,2	3,2	4,3
Septiembre	1,8	2,5	3,5	4,7
Octubre	1,9	2,9	4,0	5,3
Noviembre	2,3	3,4	4,2	5,5
Diciembre	2,0	3,2	4,3	5,7

Tabla 1. Estimaciones empíricas de índice de turbidez atmosférica de Linke para aeromasa 2,  $T_L(AM2)$ , según Tiba *et al.*

Se eligieron los valores del factor de turbidez de Linke que, aplicados al modelo de cielo claro antes descrito y aplicado a la ecuación de Suehrcke (1), dieran un mejor ajuste con los valores de tierra obtenidos por la Red Solarimétrica. A fin de cuantificarlo, se utilizaron el error cuadrático medio (RMSE, root mean square error) y el error promedio (MBE, mean bias error), definidos por las expresiones (4) y (5), divididos luego por el promedio anual de la irradiación medida y multiplicados por 100, lo que proporciona una evaluación relativa porcentual de los errores cometidos:

$$RMSE = \left[ \sum_i^n (\bar{H}_{obs} - \bar{H}_{est})^2 / n \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$MBE = \left[ \sum_i^n (\bar{H}_{obs} - \bar{H}_{est}) / n \right] \quad (5)$$

donde i indica los n distintos meses del año.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando la terminología de la Tabla 1 para identificar los valores del factor de turbidez que produjeron mejor ajuste para cada una de las localidades consideradas, en la Tabla 2 se indican a modo de ejemplo los resultados obtenidos para el promedio anual del índice de claridad de cielo claro  $K_c$  y los errores cometidos al aplicar la ecuación de Suehrcke para estimar la irradiación global media a partir de los promedios de heliofanía. El valor promedio del error cuadrático medio de todas las localidades fue de 4,1%.

Localidad	$T_L(AM2)$	$\bar{K}_c = \bar{H}_c / \bar{H}_0$	RMSE [%]	MBE [%]
Pcia. R. Sáenz Peña	industrial	0,67	3,8	-2.3
La Rioja	industrial	0,69	9,9	-6.8
Ushuaia	muy claro	0,74	3,7	-0.7
San Juan	claro	0,78	2,6	1.5
Trelew	claro	0,73	5,5	4.7
Rama Caída	urbano	0,73	2,6	-1.5
El Sombrerito	urbano	0,72	3,4	-2.3
Cerro Azul	industrial	0,68	11,2	-10.1
Villa Mercedes	industrial	0,68	3,2	1.8
Rafaela	industrial	0,67	4,5	4.3
San Miguel	industrial	0,66	2,0	1.2
Marcos Juárez	industrial	0,66	3,0	2.6
Famaillá	industrial	0,68	2,6	-0.7
Río Cuarto	industrial	0,68	2,5	1.0
Cerrillos	industrial	0,72	8,4	-7.8
Mercedes	urbano	0,72	2,9	2.4
Alto Valle	urbano	0,70	2,3	1.3
Paraná	industrial	0,67	2,9	2.3
Anguil	urbano	0,71	2,0	-0.6
Balcarce	claro	0,75	3,7	-2.4

Tabla 2. Tipo de atmósfera correspondiente al factor de turbidez de Linke que minimiza el RMSE, valor medio del índice de claridad para cielo claro correspondiente y evaluación de los errores de estimación, determinados para una serie de localidades en las que midió la Red Solarimétrica.

Cabe aclarar que la denominación europea del tipo de atmósfera tiene que entenderse como una calificación de la calidad del aire en la zona en evaluación y no significa que la misma deba tener las características indicadas en la terminología.

En la figura 1 se presenta el ajuste obtenido en la estimación de los promedios mensuales de estaciones utilizando el método de Suehrcke y el procedimiento seguido para la selección del índice de claridad correspondiente a un cielo claro en cada localidad. En el gráfico no se incluyeron los valores mensuales de La Rioja y Cerro Azul debido que los errores resultantes son del orden del 10%. Puede observarse que el ajuste logrado de esta manera es muy bueno, con un coeficiente de determinación de 0,99.

A fin de comparar los resultados con el trabajo ya citado en el que se determinaron los índices de claridad de día claro en base a los valores medidos en algunas de las estaciones de la Red Solarimétrica, se muestran en la Tabla 3 los valores calculados en este trabajo para los meses de enero y julio y su promedio anual. Al querer evaluar el error cometido en la estimación en cada estación y observar sus elevados valores en el trabajo de Grossi Gallegos *et al.* (2003), se encontró que se había cometido un error en la heliofanía relativa utilizada: los que allí se consignan son valores muy elevados, correspondiendo a los promedios de heliofanía relativa de los días claros seleccionados y no a la media general, por lo que la Tabla 2 del trabajo de Grossi Gallegos *et al.* (2003) debería modificarse en lo que hace al cálculo de los promedios mensuales de la irradiación global con un índice de claridad de día claro fijo ( $K_c=0,70$ ) y uno variable determinado localmente. En la Tabla 4 se consignan los valores medios de  $K_c$  obtenidos en su oportunidad así como los valores *corregidos* tanto de la

heliofanía media como los de irradiación global estimados en base a ellos, utilizando la expresión de Suehrcke con el índice de claridad local y el valor único de 0,70.

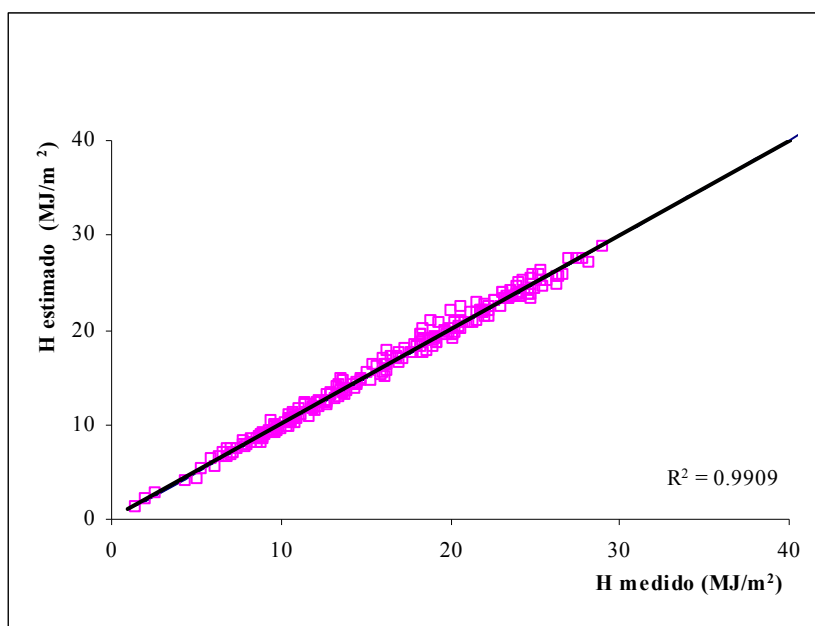


Figura 1. Correlación establecida entre los promedios estimados con la metodología presentada en este trabajo y los valores medios mensuales de irradiación global medidos en tierra en 18 localidades de Argentina.

Estación	enero	julio	anual
Alto Valle	0,72	0,67	0,70
Anguil	0,71	0,69	0,71
Balcarce	0,75	0,75	0,75
Cerrillos	0,72	0,72	0,72
Cerro Azul	0,68	0,68	0,68
El Sombrerito	0,72	0,71	0,72
Famaillá	0,69	0,68	0,68
La Rioja	0,69	0,68	0,69
Marcos Juárez	0,67	0,66	0,66
Mercedes	0,72	0,71	0,72
Paraná	0,67	0,66	0,67
Rafaela	0,67	0,66	0,67
Rama Caída	0,74	0,72	0,73
San Juan	0,77	0,78	0,78
San Miguel	0,67	0,65	0,66
Trelew	0,74	0,70	0,73
Ushuaia	0,78	0,65	0,74

Tabla 3. Valores calculados en este trabajo del promedio del índice de claridad  $K_c$  correspondiente a un día claro para los meses de enero y julio y su promedio anual.

**REVISION ASADES 2003**

Estación	Mes	$K_{\text{día claro}}$	Rad. Medida(MJ/m <sup>2</sup> )	Hel. Relativa	$H_0$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$K_t$ estimado	$H_{\text{est local}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$H_{\text{est 0.70}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )
San Miguel	ene	0.66	24.0	0.69	43.22	0.55	23.7	25.1
	jul	0.65	7.8	0.50	17.22	0.46	7.9	8.5
Cnia. Sta .Rosa	ene	0.67	18.60	0.45	46.45	0.45	20.9	21.8
	jul	0.68	9.90	0.48	20.24	0.47	9.5	9.8
Famaillá	ene	0.65	20.60	0.47	45.53	0.45	20.3	21.9
	jul	0.65	9.70	0.48	19.38	0.45	8.7	9.4
R. de la Frontera	ene	0.64	18.30	0.47	45.86	0.44	20.1	22.0
	jul	0.63	11.00	0.62	19.69	0.50	9.8	10.9
Abra Pampa	ene	0.69	25.30	0.62	46.56	0.54	25.3	25.7
	jul	0.81	19.00	0.83	20.35	0.74	15.0	13.0
Cerrillos	ene	0.64	19.30	0.46	46.08	0.43	20.0	21.9
	jul	0.66	11.40	0.58	19.90	0.50	10.0	10.6
Paraná	ene	0.66	23.40	0.65	44.13	0.53	23.5	24.9
	jul	0.68	9.80	0.55	18.07	0.50	9.1	9.4
La Rioja	ene	0.66	21.30	0.61	44.86	0.52	23.1	24.5
	jul	0.69	10.30	0.54	18.76	0.51	9.5	9.6
Oliveros	ene	0.68	20.60	0.64	43.89	0.54	23.9	24.6
	jul	0.64	7.60	0.51	17.85	0.46	8.2	8.9
San Juan	ene	0.70	27.80	0.69	44.19	0.58	25.7	25.7
	jul	0.76	10.70	0.57	18.13	0.57	10.4	9.6
Anguil	ene	0.69	24.80	0.64	42.53	0.55	23.5	23.8
	jul	0.66	7.10	0.45	16.58	0.44	7.3	7.8
Alto Valle	ene	0.67	25.40	0.71	41.58	0.56	23.5	24.5
	jul	0.66	6.60	0.42	15.69	0.43	6.7	7.1
Balcarce	ene	0.68	23.70	0.53	42.06	0.50	20.8	21.4
	jul	0.66	6.80	0.40	16.14	0.42	6.7	7.1
Cerro Azul	ene	0.65	20.60	0.62	45.37	0.51	23.2	25.0
	jul	0.68	9.70	0.53	19.23	0.50	9.5	9.8
El Colorado	ene	0.63	20.50	0.64	45.73	0.50	23.0	25.6
	jul	0.65	8.30	0.54	19.57	0.48	9.3	10.1
El Sombrerito	ene	0.68	24.00	0.66	45.41	0.55	25.1	25.8
	jul	0.70	10.90	0.52	19.27	0.50	9.7	9.7
La Consulta	ene	0.66	21.90	0.70	43.50	0.55	24.0	25.5
	jul	0.72	8.40	0.53	17.48	0.52	9.2	8.9
Marcos Juárez	ene	0.67	23.70	0.65	43.85	0.54	23.7	24.7
	jul	0.84	9.00	0.51	17.81	0.60	10.7	8.9
Mercedes	ene	0.70	25.40	0.67	44.94	0.57	25.7	25.7
	jul	0.73	11.60	0.57	18.83	0.55	10.4	10.0
Pergamino	ene	0.70	27.20	0.73	43.44	0.60	26.0	26.0
	jul	0.65	8.10	0.57	17.43	0.49	8.6	9.2
Rama Caída	ene	0.68	25.20	0.66	43.18	0.55	23.9	24.6
	jul	0.69	9.60	0.56	17.18	0.52	8.9	9.0
Trelew	ene	0.67	26.30	0.61	39.86	0.52	20.9	21.8
	jul	0.66	6.20	0.42	14.08	0.43	6.0	6.4

Tabla 4. Valores medios de  $K_c$  determinados en 2003 para 21 estaciones de la Red Solarimétrica en los meses de enero y julio, valores medios de irradiación solar global medidos y valores **corregidos** de heliofania relativa e irradiación solar global estimados por el método de Suehrcke utilizando un valor fijo de 0.70 para el índice de claridad de día claro y utilizando los valores determinados localmente para dicho índice.

## CONCLUSIONES

Se analizó el comportamiento de la ecuación establecida por Suehrcke para estimar valores medios de irradiación solar global a partir de una variable mucho más difundida, como es la heliofanía. Para ello, se utilizó un modelo de cielo claro propuesto para la elaboración del Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA) y se usó una modificación introducida por Tiba *et al.* (2005) en un trabajo similar llevado a cabo sobre datos del Brasil. Los resultados alcanzados son muy satisfactorios y apuntan a recomendar el uso de esta ecuación para ampliar la cobertura de las cartas de valores medios de irradiación solar existentes en esta región. Una combinación de métodos podría ofrecer aún mejores resultados, esto es, determinar los valores del índice de claridad de cielo claro a partir de una base de datos diarios y utilizar luego los algoritmos propuestos en el ESRA para el modelo de cielo claro.

## REFERENCIAS

- Driesse, A. y Thevenard, D. (2002) A test of Suehrcke's sunshine-radiation relationship using global data set. *Solar Energy* **2**, 2, 167-175.
- Fasulo, A., Adaro, J., Nieto, M. B. (2006) Análisis de cinco años de mediciones de la radiación solar en la ciudad de San Luis. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **10**, 2, 11.27-11.33 versión CD-ROM.
- 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., Righini, R., Raichijk, C. (2005) Alternativas para la evaluación del recurso solar en Argentina. En *Actas del I Congreso Nacional de Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN)*, versión CD-ROM (ISBN 987-21933-2-0), S. C. de Bariloche, Argentina.
- Grossi Gallegos, H., Roberti, A., Sierra, V. (2006) *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **10**, 2, 11.09-11.14 versión CD-ROM.
- Grossi Gallegos, H., Righini, R., Raichijk, C. (2006) Analysis of alternatives for the assessment of the solar resource in Argentina. En *Proceedings of the World Renewable Energy Congress IX (WREC IX)*, Versión CD-ROM. Elsevier Ltd. and Florence University.
- Remund, J., Wald, L., Lefèvre, M., Ranchin, T., Page, J. (2003) Worldwide Linke turbidity information. En *Proceedings of ISES Solar World Forum Congress*, 16-19 June 2003, Göteborg, Sweden.  
Disponible en <http://www.helioclim.net/publication/ises2003>
- Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L. (2000) On the clear sky model of the European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. *Solar Energy* **68**, 1, 33-48.
- Suehrcke H. (2000) On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: Ångström's equation revisited. *Solar Energy* **68**, 5, 417-425.
- Tiba, C., Aguiar, R., Fraidenraich, N. (2005) Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy* **30**, 957-966.
- Torres Deluigi, M. y Fasulo, A. (2002) Aplicación y evaluación experimental de la ecuación de Suehrcke para calcular la fracción de días claros a través del índice de claridad. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **6**, 2, 11.19-11.24 versión CD-ROM (2002).

**ABSTRACT:** An assessment of an alternative application in Argentina of the Suehrcke relationship has been made. A clear sky model, based on a generalization of Beer-Lambert-Bouguer's law using an integrated Rayleigh optical thickness and an adaptation of the Linke turbidity factor as in the European Solar Radiation Atlas, have been used. A value of RMSE for the total set of data (20 localities) results in 4,1 %. This procedure, by converting the large database of sunshine hours, existing in the region, into global irradiation, might expand considerably this information.

**Key words:** irradiation, estimates, sunshine hours, Suehrcke, Argentina.