



## ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE TURBIDEZ DE LINKE PARA DISTINTAS LOCALIDADES DE ARGENTINA

C. Raichijk

GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas,  
Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján,  
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: [gersolar@yahoo.com.ar](mailto:gersolar@yahoo.com.ar)

**RESUMEN:** En este trabajo se determinó el índice de turbidez para una aeromasa igual a dos,  $T_L$  (M2), en 10 localidades de la República Argentina mediante el empleo del modelo de cielo claro europeo (ESRA). Para ello se contó con una base de datos de irradiación solar global diaria correspondientes al período 1978-2003. Se evaluó, en primer lugar, el criterio utilizado de selección de días claros empleando la correlación de Suehrcke y datos de heliofania disponibles en las localidades estudiadas. Por otro lado, se compararon los valores de  $T_L$  (M2) estimados en este trabajo con valores publicados en cartas mundiales del parámetro por el proyecto SoDa. Para localidades ubicadas en zonas planas y climáticamente homogéneas se encontraron errores cuadráticos medios absolutos que varían entre 0,36 y 0,82, mientras que en zonas de montaña como Famaillá y Rama Caída los desvíos absolutos son de 1,33 y 1,69 respectivamente.

**Palabras clave:** Índice de turbidez de Linke, modelo de cielo claro europeo, Argentina.

### INTRODUCCIÓN

El índice de turbidez,  $T_L$  (M), en un modelo parametrizado de atenuación de la radiación solar bajo condiciones de cielo claro determina el número de atmósferas limpias y secas equivalentes debido al contenido de humedad y de aerosoles presentes en la atmósfera. Este factor, así como el valor asociado de irradiación solar global de día claro,  $H_c$ , son de gran utilidad tanto en el campo de las energías renovables, al dimensionar sistemas aplicados, como en el estudio del sistema climático y de la polución atmosférica.  $T_L$ (M) puede ser determinado a partir de datos obtenidos en días claros, pero este tipo de información es muy poco frecuente. En general se cuenta con bases de datos de irradiación solar global o, en el mejor de los casos, de irradiación directa para todo tipo de cielo, lo que determina la necesidad de seleccionar previamente los casos libres de la influencia de nubes.

Cucumo *et al.* (2000) proponen estimar el valor del índice de turbidez para los días con valores máximos de irradiación global en cada mes del año. El método consiste en determinar primero, mediante correlaciones de descomposición, los valores horarios de la componente directa, para luego en el marco de un modelo determinado de atenuación estimar para cada hora del día el índice de turbidez, tomando finalmente como valor medio del mismo el promedio de los distintos valores obtenidos a lo largo del día. Se utilizó en esta oportunidad como espesor óptico integrado de Rayleigh la parametrización respecto a la aeromasa propuesta por Kasten (1996). Diabaté *et al.* (2003) determinan el índice de turbidez para una aeromasa igual a 2,  $T_L$  (M2), en distintas localidades de África a partir de datos diarios de irradiación solar global utilizando el modelo de cielo claro empleado en la confección del Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA). Con el objeto de eliminar los casos de días nublados se seleccionó la información analizada siguiendo un criterio basado en el índice diario de claridad,  $K_t$ , como se propone en Remund *et al.* (2003).

Tiba (2006) compara para distintas localidades del Amazonas valores estimados de  $T_L$ (M2) empleando el modelo de cielo claro europeo para valores diarios máximos de irradiación solar global de cada mes suministrados por la red SOLRAD-NET con valores de  $T_L$ (M2) obtenidos con datos de contenido de agua precipitable y espesor óptico de aerosol publicados por la red AERONET.

En este trabajo aplicando el método empleado por Diabaté *et al.* (2003) se determina en 10 localidades de la República Argentina el índice de turbidez para una aeromasa 2,  $T_L$  (M2). Por otro lado, y a fin de evaluar primero el criterio utilizado en la selección de los días de cielo claro, se estima a partir de los valores medios de  $H_c$ , previamente establecidos, y datos disponibles de heliofania, la irradiación global media mensual aplicando la correlación propuesta por Suehrcke (2000). Se comparan entonces la irradiación global medida y la estimada determinando el desvío cuadrático medio relativo, RMSE%, y el sesgo medio relativo, MBE% entre ambos valores. Por último, empleando los mismos estimadores estadísticos, se comparan los valores de  $T_L$  (M2) obtenidos en este trabajo con valores publicados en cartas mundiales del parámetro disponibles en la página del proyecto SoDa, <http://www.soda-is.com>. Estas cartas fueron generadas utilizando el modelo de cielo claro europeo (Remund *et al.* ,2003). Se fusionó una grilla base de valores de  $T_L$  (M2) estimados a partir de datos satelitales de  $H_c$  publicados por NASA en el proyecto SRB (Solar Radiation Budget Project) con valores estimados a partir de información específica de distintas localidades. Para ello previamente se modificó la resolución espacial inicial de 160', definida por los datos de NASA, a 20' mediante correlaciones con otros valores satelitales de mayor resolución y relacionados con el índice de turbidez como contenido de vapor o alturas topográficas.

Como información local se utilizaron datos de tierra de irradiación directa horaria e irradiación global diaria, seleccionando los casos correspondientes a días claros con un criterio basado en el índice de claridad. A su vez se consideraron datos satelitales de contenido de vapor de agua y espesor óptico de aerosoles publicados para las estaciones de la red AERONET. Al evaluar los valores finales de  $T_L$  (M2) obtenidos para todo el mundo se encontraron errores cuadráticos medios absolutos para los distintos meses que varían entre 0,63 y 0,89. Con respecto a nuestro país cabe destacar que sólo se utilizó información de las estaciones Córdoba-CETT y Buenos Aires-Ceilap pertenecientes a la red AERONET, siendo Florianópolis en Brasil la estación considerada con datos de tierra más cercana.

## MATERIALES Y MÉTODO

Para el presente trabajo se utilizaron datos diarios de irradiación solar global de 10 localidades del país suministrados por la Red Solarimétrica Argentina para el período 1978-2003 y que fueran adquiridos con piranómetros termoelectricos. A su vez se contó para dichas estaciones con los promedios mensuales de heliofanía efectiva (horas de insolación) medida con heliógrafos del tipo Campbell-Stokes, facilitados por el Servicio Meteorológico Nacional para el período 1956-2006. En la Tabla 1 se consigna la lista de las estaciones estudiadas, su localización geográfica y el período de mediciones considerados para cada una de ellas.

Los modelos parametrizados de cielo claro, basados en una generalización de la ley de Beer, pueden utilizar un único factor de dispersión para modelar en todo el espectro la atenuación de la componente directa de la irradiación solar incidente en un día de cielo claro. El modelo de cielo claro utilizado en este trabajo es el empleado en la confección del Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA), detallado por Rigollier *et al.* (2000) incluyendo las posteriores correcciones con respecto a la altura descriptas por Remund *et al.* (2003), tanto para la expresión del espesor óptico de Rayleigh como para la definición de la componente difusa.

Se define entonces la componente directa sobre plano horizontal en día de cielo claro de la siguiente manera:

$$I_{bc} = \epsilon I_{cs} \sin \gamma_s \exp [-0,8662 T_L(M2) m \delta_R(m)] \quad (1)$$

donde  $I_{bc}$  es la irradiación solar directa de un día claro, proyectada sobre un plano horizontal,  $\epsilon$  la corrección a la distancia media Sol-Tierra,  $I_{cs}$  la constante solar ( $1367 \text{ W/m}^2$ ),  $\gamma_s$  la altura solar,  $m$  la aeromasa óptica relativa (adimensional),  $T_L$  (M2) el llamado factor de turbidez de Linke (que expresa el número de atmósferas limpias y secas equivalentes) determinado para una aeromasa igual a 2 y  $\delta_R(m)$  el espesor óptico integral de Rayleigh (promediado sobre todas las longitudes de onda), que se define en función de la aeromasa.

Estaciones				Período	
	Lat (°)	Long (°)	Altura (m)	Irrad.	Heliof.
R. S. Peña	-26,87	-60,45	90	80-86	80-86
Famaillá	-27,05	-65,42	363	78-86	79-86
Sombrerito	-27,67	-58,77	57	79-86	79-86
Mercedes	-29,17	-58,02	95	80-88	80-88
Rafaela	-31,28	-61,55	100	79-96	61-06
Paraná	-31,78	-60,48	110	79-03	56-00
M. Juárez	-32,68	-62,12	115	78-89	56-00
S. Miguel	-34,55	-58,73	26	79-03	56-00
R. Caída	-34,67	-68,38	692	80-85	80-85
Alto Valle	-39,02	-67,67	242	79-88	71-92

Tabla 1. Descripción de las estaciones y datos usados en el presente trabajo.

A fin de eliminar los datos de irradiación solar correspondientes a días nublados se seleccionó la información disponible aplicando un criterio basado en el índice diario de claridad,  $K_t = H/H_0$ , (Diabaté *et al.*, 2003). Para cada estación y mes del año se consideran sólo los datos de irradiación global diaria que satisfagan las siguientes condiciones:

- si  $\gamma_{S noon} > 30^\circ$  entonces  $K_t > 0,8 \overline{k'_t min}$
- si  $30^\circ \geq \gamma_{S noon} \geq 15^\circ$  entonces  $K_t > 0,6 \overline{k'_t min}$  (2)
- si  $15^\circ \geq \gamma_{S noon} > 4^\circ$  entonces  $K_t > 0,4 \overline{k'_t min}$
- si  $\gamma_{S noon} \leq 4^\circ$  el dato se descarta

donde  $\gamma_{S noon}$  es la altura solar al mediodía del lugar y  $\overline{k'_t min}$  el promedio diario del valor mínimo del índice de claridad horario corregido por el ángulo solar  $k'_t min$  (Pedrós *et al.*, 1999):

$$k'_t min = \frac{0,7}{\left[ 1,031 \exp \left( -1,4 / (0,9 + 9,4 / (m \cdot p / p_0)) \right) + 0,1 \right]} \quad (3)$$

siendo  $m$  la aeromasa óptica relativa definida en el modelo de cielo claro (Remund *et al.*, 2003):

$$m(\gamma_s) = \frac{(p / p_0)}{\left[ \sin(\gamma_s) + 0,50572 \cdot (57,29578 \cdot \gamma_s + 6,07995) \right]^{-1,6364}} \quad (4)$$

$\gamma_s$  es la altura solar y el cociente  $p/p_0$  se define en función de la altura del lugar  $z$ :

$$p/p_0 = \exp(-z/8435,2) \quad (5)$$

Siguiendo la recomendación propuesta por Remund *et al.* (2003) se tomó como valor medio mensual  $\overline{H_c}$  el promedio de los 6 valores medios mensuales más altos si la base de datos es mayor o igual a 10 años, de los 5 mayores si la base es de 8-9 años, de 4 si es de 6-7 años, promediando todos los valores medios mensuales si la base de datos es de 5 años. No se consideraron estaciones con una base de datos de menos de 5 años. Luego para cada lugar y mes del año aplicando los algoritmos para las expresiones de las componentes directa y difusa del modelo de cielo claro empleado se obtuvieron los valores de  $T_L(M2)$  que mejor ajustan los valores medios mensuales de irradiación global de cielo claro previamente seleccionados.

Con el objeto de evaluar en primera instancia los valores medios mensuales  $\overline{H_c}$  seleccionados mediante el criterio expresado en (2) y utilizando datos disponibles de heliofanía, con una extensión en la mayoría de las estaciones de más de 40 años, se estimaron en cada lugar los valores medios mensuales de la irradiación global diaria aplicando la correlación propuesta por Suehrcke (2000):

$$\frac{\overline{n}}{N} = \left( \frac{\overline{K_t}}{\overline{K_c}} \right)^2 = \left( \frac{\overline{H}}{\overline{H_c}} \right)^2 \quad (6)$$

donde  $\overline{H}$  es la irradiación global diaria media mensual,  $\overline{H_c}$  la irradiación global media mensual de día claro obtenidos en este caso mediante (2),  $\overline{n}$  el valor medio de horas de brillo de Sol registradas en un heliógrafo de Campbell-Stokes (heliofania efectiva) y  $\overline{N}$  la duración teórica promedio del día medida en horas. Se comparan entonces valores de irradiación global medidos y estimados mediante el error cuadrático medio relativo, RMSE% y el sesgo medio relativo, MBE%:

$$RMSE\% = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (\overline{H}_{obs} - \overline{H}_{est})^2 / n \right]^{1/2}}{(\sum_{i=1}^n \overline{H}_{obs} / n)} 100\% \quad (7)$$

$$MBE\% = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{H}_{obs} - \overline{H}_{est})}{\sum_{i=1}^n \overline{H}_{obs}} \right] 100\% \quad (8)$$

siendo  $\overline{H}_{obs}$  y  $\overline{H}_{est}$  los valores de irradiación global observados y estimados respectivamente tomados para los distintos n meses del año.

Finalmente se compararon los valores de  $T_L(M2)$  estimados en este trabajo con valores publicados por el proyecto SoDa, determinando para ello los errores cuadráticos medios absolutos, RMSE, y los sesgos medios absolutos, MBE, en cada localidad para todo el año.

## RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos de RMSE% y MBE% al comparar valores de irradiación global media mensual medidos y estimados por medio de la correlación de Suehrcke (6), utilizando valores de  $\overline{H_c}$  seleccionados aplicando el criterio (2)

Estaciones	RMSE %	MBE%
R. S. Peña	3,6	-2,3
Famaillá	3,8	1,1
Sombrerito	1,8	0,1
Mercedes	3,0	1,6
Rafaela	2,4	-1,5
Paraná	2,6	-2,2
M. Juárez	2,0	-0,05
San Miguel	4,6	-3,7
Rama Caída	5,4	4,4
Alto Valle	4,7	3,4

Tabla 2. RMSE% y MBE% obtenidos al comparar la irradiación global diaria media mensual medida y la estimada mediante la correlación de Suehrcke utilizando valores medios mensuales  $\overline{H_c}$  determinados en este trabajo.

La serie de valores medios mensuales de  $T_L(M2)$  obtenida para las 10 estaciones se consigna en la Tabla 3 y en la Tabla 4 se muestran los valores de RMSE y MBE obtenidos al comparar los valores de  $T_L(M2)$  estimados en este trabajo con valores publicados por el proyecto SoDa.

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
R. Sáenz Peña	4,8	4,7	4,6	4,0	3,5	3,0	3,4	4,0	4,1	4,1	4,5	4,8
Famaillá	5,1	4,3	4,6	4,1	3,8	3,7	4,0	3,9	4,4	5,0	4,8	5,1
El Sombrerito	4,3	4,3	3,8	3,4	2,9	2,7	2,8	3,1	3,6	3,8	4,1	4,3
Mercedes	4,0	3,7	3,5	3,2	2,4	2,4	2,4	2,8	3,2	3,6	3,6	4,0
Rafaela	4,1	3,9	3,8	3,1	2,9	2,8	2,9	3,2	3,5	3,6	3,6	4,0
Paraná	4,2	4,2	3,9	3,2	3,1	3,0	2,8	2,9	3,5	3,7	4,2	4,3
Marcos Juárez	4,5	4,1	4,1	3,5	3,0	3,3	3,4	3,4	3,8	4,0	4,4	4,4
San Miguel	4,0	3,9	3,2	2,9	2,8	2,7	2,2	2,8	3,5	3,6	3,4	3,7
Rama Caída	5,0	4,6	4,6	3,6	3,5	3,1	3,1	3,8	4,0	4,7	4,9	5,1
Alto Valle	4,4	4,0	4,1	3,3	3,4	3,4	3,2	2,7	3,4	3,7	4,1	4,3

Tabla 3. Valores medios mensuales de  $T_L(M2)$  obtenidos en las 10 estaciones consideradas.

Estaciones	RMSE	MBE
R. S. Peña	0,36	0,13
Famaillá	1,33	1,28
Sombrerito	0,64	-0,06
Mercedes	0,53	-0,35
Rafaela	0,46	0,33
Paraná	0,52	0,32
M. Juárez	0,82	0,69
San Miguel	0,39	0,04
Rama Caída	1,69	1,59
Alto Valle	0,49	-0,43

Tabla 4. RMSE y MBE obtenidos al comparar los valores de  $T_L(M2)$  estimados en este trabajo con valores publicados por el proyecto SoDa (valores positivos de MBE indican que el valor publicado por SoDa es menor).

## CONCLUSIONES

Se estimaron valores medios mensuales de  $T_L(M2)$  en 10 localidades de la República Argentina aplicando el modelo de cielo claro europeo (ESRA) para valores de irradiación global de cielo claro previamente seleccionados de la base de datos original siguiendo un criterio basado en el índice diario de claridad. Luego y con el objeto de evaluar el método de selección de días de cielo claro antes mencionado se estimó a partir de datos disponibles de heliofanía la irradiación global mediante la correlación de Suehrcke. Al comparar los valores estimados con los medidos se obtienen valores de RMSE%, que varían entre 1,8 y 5,4%, indicando que el criterio de selección es adecuado.

Por otro lado se compararon los valores de  $T_L(M2)$  estimados en este trabajo con valores publicados en cartas mundiales del parámetro. Para todas las estaciones, exceptuando Famaillá y Rama Caída, se encontraron errores medios absolutos para todo el año que varían entre 0,36 y 0,82 y que se ubican dentro del rango de desvíos hallados para todo el mundo. Desvíos absolutos más significativos en Famaillá y Rama Caída, con sesgos que indican una subestimación del parámetro por parte de las cartas publicadas por SoDa, estarían mostrando que para zonas de montaña y de mayor heterogeneidad climática los valores de  $T_L(M2)$  estimados a partir de información satelital conllevan un mayor grado de imprecisión.

## REFERENCIAS

- Cucumo M., Kaliakatsos D., Marinelli V. (2000). A calculation method for the estimation of the Linke turbidity factor. *Renewable Energy*, **19**, 249-258.
- Diabaté L., Remund J., Wald L. (2003). Linke turbidity for several sites in Africa. *Solar Energy*, **75**, 111-119.
- Kasten F. (1996). The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy* **56**, 3, 239-244.
- Pedros R., Utrillas P., Martínez Lozano J. A., Tena F. (1999). Values of broad band turbidity coefficients in a mediterranean coastal site. *Solar Energy* **66** (1), 11-20.
- 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 ESRA-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. (2006). Estimating atmospheric Linke turbidity from climatic data for Amazonian tropical sites. En *Proceedings of the World Renewable Energy Congress IX (WREC IX)*, Versión CD-ROM. Elsevier Ltd. and Florence University.

**ABSTRACT:** In this work the Linke factor of turbidity for an air mass equal to 2,  $T_L$  (M2), was determined for 10 sites in Argentina through the use of the clearly European sky model (ESRA). For it was counted on a data base of daily solar global irradiation corresponding to the period 1978-2003. First of all, it was evaluated the used selection criterion for clear days through Suehrcke correlation and sunshine hours data available in the studied sites. On the other hand, estimates of  $T_L$  (M2) considered in this work were compared with values published in worldwide maps of the parameter by the SoDa Project. For localities located in flat and climatically homogenous zones were found root mean squares errors that vary from 0.36 to 0.82, whereas in zones of mountain zones as Famaillá and Rama Caída RMSE were 1.33 and 1.69, respectively.

**Key words:** Linke turbidity factor, European clear sky model, Argentina.