

## APLICACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO DE YANG A DATOS CLIMÁTICOS MEDIOS MENSUALES DE 10 LOCALIDADES DE ARGENTINA.

Germán A. Salazar

Departamento de Física - Facultad de Ciencias Exactas - Universidad Nacional de Salta  
INENCO - Salta  
Avda. Bolivia 5150 - CP A4408FVY – Salta Capital – Argentina  
e-mail: [germansalazar.ar@gmail.com](mailto:germansalazar.ar@gmail.com)

*Recibido: 13-04-10; Aceptado: 10-5-10.*

**RESUMEN.-** En este trabajo se aplicó el modelo híbrido de Yang a datos tomados en 10 sitios de Argentina. Utilizando valores medios mensuales medidos de temperatura, humedad relativa, heliofanía absoluta y los valores de las constantes a, b, c, y d calculadas por Yang para Japón, se calculó la componente directa horizontal y la componente difusa de la irradiación global para cada mes en cada sitio, obteniéndose una muy buena correlación entre los valores estimados y los medidos de irradiación global horizontal. Para determinar si las componentes difusas estimadas por Yang eran representativas se las compararon con las estimadas según el modelo de Erbs. Se determinó que la heliofanía debe corregirse por exceso (+10% del valor medido) para que la correlación general mejore. El valor medio anual del índice de turbidez  $\beta$  de Ångström estimado por Yang resulta ser aproximado para algunos sitios.

**Palabras claves:** modelo híbrido, heliofanía, irradiación directa y difusa, turbidez, Argentina.

## APPLICATION OF YANG HYBRID MODEL TO MEAN MONTHLY CLIMATE DATA OF 10 SITES IN ARGENTINA

**ABSTRACT.-** In this paper the Yang hybrid model was applied to data taken at 10 sites in Argentina. Using measured monthly average values of temperature, relative humidity, absolute sunshine hours and the constants a, b, c, d calculated by Yang for Japan, we calculated the horizontal direct component and the diffuse component of global radiation for each months at each site, obtaining a very good correlation between estimated and measured values of global horizontal irradiation. To determine whether the diffuse components estimated by Yang were representative they are compared with those estimated by the model of Erbs. It was determined that sunshine hours should be corrected + 10% of measured values to improve the general correlation. The mean annual Ångström turbidity index  $\beta$ , estimated by Yang, is approximate for some sites.

**Keywords:** hybrid model, sunshine hours, direct and diffuse insolation, turbidity, Argentina.

### 1. INTRODUCCIÓN

Desde que se demostró que la inyección desmedida en la atmósfera de CO<sub>2</sub>, generado por el uso de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo), incrementa el efecto invernadero natural del planeta al grado de generar cambios en el clima mundial (IPCC, 2001), el estudio y utilización de las denominadas “Energías Renovables” o “Energías Limpias” ha experimentado un marcado auge a nivel mundial.

Una de las energías renovables más abundantes en nuestro país, principalmente en el Norte del mismo, es la solar. La determinación de las características regionales de esta energía es una herramienta fundamental al momento de diseñar y dimensionar sistemas térmicos o fotovoltaicos. La cantidad de energía disponible y el tiempo que está disponible son datos imprescindibles para iniciar cualquier análisis de factibilidad. La carencia de continuidad, sistematización, estandarización y automatización en las mediciones de radiación solar en nuestro país resulta ser un problema a solucionar.

Los datos de irradiación solar global medidos por la ya extinta Red Solarimétrica, sumado a valores de irradiación estimados usando el modelo de Ångström-Prescott (que necesita datos de heliofanía relativa), han permitido la elaboración del Atlas de Radiación Solar de la República Argentina (Grossi Gallegos y Righini, 2007).

Para paliar la falta de datos se utilizan modelos para estimar los valores de irradiación global que no han podido ser medidos de manera directa. Uno de los modelos más populares para estimar valores de irradiación global es el modelo de Ångström-Prescott (Ångström, 1929; Prescott, 1940). Está basado en la determinación del valor de las constantes de regresión (pendiente y ordenada al origen) a partir de valores de heliofanía relativa media mensual  $\bar{n}/\bar{N}$  (variable independiente) y valores de índice de claridad medio mensual  $\bar{H}/\bar{H}_0$  (variable dependiente). La relación entre estas dos variables es una función lineal.

Existen muchos trabajos realizados al respecto, tanto a nivel internacional como nacional. La mayoría de ellos trata de establecer los efectos de la dispersión geográfica en los valores de las constantes, resaltando la utilidad de poder encontrar valores “universales” para dichas constantes. Para ello realizan variaciones en la expresión de la función que relaciona a  $\bar{n}/\bar{N}$  con  $\bar{H}/\bar{H}_0$  (Iqbal, 1979, Ma e Iqbal, 1984; Gopinathan, 1988; Rietveld, 1978; Akinoglu y Ecevit, 1990) o buscando significado físico en los valores de las variables (Mani y Rangarajan, 1983; Hinrichsen, 1994).

Gracias al paulatino abaratamiento que han tenido los sensores de radiación solar, al aumento en la exactitud de los mismos y a la posibilidad de acceder más fácilmente a datos obtenidos mediante satélites, los modelos para estimar irradiación /irradiancia basados en datos de heliofanía están siendo dejados de lado por otros que usan principios físicos en vez de correlaciones (Gueymard *et al*, 2009). Sin embargo, los valores de irradiación global presentados en bases de datos generadas con modelos físicos e información satelital (principalmente SSE y SWERA) no resultan ser exactos al compararlos con valores medidos en superficie.

## 2. EL MODELO DE ÅNGSTRÖM-PRESCOTT

El modelo de Å-P permite determinar el valor de la irradiación global media mensual  $\bar{H}$  a través de la determinación de dos constantes  $a$  y  $b$  tal que

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (1)$$

donde  $\bar{H}_0$  es el valor de la irradiación media mensual extraterrestre,  $\bar{n}$  es el valor de la heliofanía efectiva media mensual y  $\bar{N}$  es el valor medio mensual de la heliofanía astronómicamente posible de medir, es decir, para día claro.

Una de las debilidades del modelo de Å-P es que el rango de error que se tiene en la determinación de la cantidad de horas de brillo solar, por impresión en fajas de heliógrafos tipo Campbell-Stokes, es notable. El rango de valores de irradiancia para que las fajas se marquen (se quemem) oscila entre 16 y 400 W/m<sup>2</sup> (Gueymard, 1993). La Organización Mundial de Meteorología considera que el sol brilla cuando se tienen valores de radiación directa normal superiores a 120 W/m<sup>2</sup>. Esta aclaración es importante ya que el error que se tenga en la determinación de la heliofanía se trasladará directamente al valor de irradiación estimado con este método.

Para Argentina el valor de la constante  $a$  varía en un rango de 0.1 a 0.33, mientras que la constante  $b$  entre 0.4 a 0.77 (Righini *et al*, 2005). Estos valores coinciden con los encontrados para China (Xu, 1993), pero esta “homogeneidad” es relativa.

## 3. EL MODELO HÍBRIDO DE YANG

Para estimar el valor de la irradiación global media  $H$ , Yang *et al* (2001) plantean una expresión matemática similar a la de Å-P, pero usa las componentes directa  $H_b$  y difusa  $H_d$  de la irradiación global en vez de la irradiación extraterrestre  $H_0$ , tal como se muestra a continuación

$$\bar{H} = (a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}})\bar{H}_b + (c + d \frac{\bar{n}}{\bar{N}})\bar{H}_d \quad (2)$$

De esa manera el modelo busca considerar procesos físicos de atenuación atmosférica, como la turbidez, cantidad de vapor de agua y de ozono, sin perder la simplicidad matemática del modelo de Å-P.

El modelo híbrido de Yang ha sido evaluado, junto a otros 20 modelos de radiación (Gueymard, 2003), resultando seleccionado entre los 4 mejores. Esto indica que el modelo es altamente confiable en sus predicciones.

Para la determinación de los valores de  $H_b$  y  $H_d$  se precisa de la integración temporal de valores de irradiancia directa normal  $G_{bn}$  e irradiancia difusa  $G_d$ . Generalmente estos valores se miden con pirheliómetros y piranómetros, respectivamente, pero estas medidas carecen de información sobre las transmitancias (relacionadas a las absorciones de la radiación solar por parte de los elementos constitutivos de la atmósfera), las que solo pueden determinarse a partir de medidas *espectrales* de irradiancia directa y difusa. La integración, en gran ancho de banda, de las irradiancias espectrales es un cálculo que resulta muy oneroso de realizar, incluso poseyendo dispositivos de gran capacidad de cálculo, pero es necesario si se desea caracterizar a los procesos físicos que afectan (atenuan) la radiación solar extraterrestre que atraviesa la atmósfera terrestre.

Los modelos físicos de transferencia radiativa en atmósfera describen el proceso de atenuación de la radiación solar al atravesar la atmósfera terrestre en función de transmitancias, que son funciones de la longitud de onda  $\lambda$ . La presentación, en el trabajo de Yang *et al* (2001), de un método para la estimación de los valores integrados en gran ancho de banda de esas transmitancias resultan ser un aporte importante.

Usando las expresiones de Leckner (1978) Yang *et al* estima los valores integrados en toda longitud de onda de  $\bar{\tau}_b$  y  $\bar{\tau}_d$  usando 5 transmitancias, también integradas en longitud de onda, relacionadas con los principales elementos que atenuan la radiación extraterrestre que atraviesa la atmósfera: ozono ( $\bar{\tau}_{oz}$ ), agua ( $\bar{\tau}_w$ ), mezcla de gases ( $\bar{\tau}_g$ ), efecto Rayleigh ( $\bar{\tau}_r$ ) y aerosoles ( $\bar{\tau}_a$ ). En el Apéndice A se explicitan estas ecuaciones.

Las expresiones de las transmitancias directa y difusa integradas es planteada como

$$\bar{\tau}_b \approx \bar{\tau}_{oz} \cdot \bar{\tau}_w \cdot \bar{\tau}_g \cdot \bar{\tau}_r \cdot \bar{\tau}_a - 0.013 \quad (3.a)$$

$$\bar{\tau}_d \approx \bar{\tau}_{oz} \cdot \bar{\tau}_g \cdot \bar{\tau}_w \cdot (1 - \bar{\tau}_r \cdot \bar{\tau}_a) + 0.013 \quad (3.b)$$

donde  $\bar{\tau}_b$  es la transmitancia directa normal y  $\bar{\tau}_d$  es la transmitancia difusa.

Las irradiaciones  $H_b$  y  $H_d$  se definen en función de las transmitancias normal  $\bar{\tau}_b$  y difusa  $\bar{\tau}_d$  de tal manera que

$$H_b = \int I_0 \cdot \gamma \cdot \bar{\tau}_b \cdot \cos\theta_z \cdot dt \quad (4.a)$$

$$H_d = \int I_0 \cdot \gamma \cdot \bar{\tau}_d \cdot \cos\theta_z \cdot dt \quad (4.b)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar,  $I_0$  es la constante solar ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) y  $\gamma$  es la corrección por la órbita terrestre, definido como

$$\gamma = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi \cdot (d-2)}{365}\right) \quad (5)$$

donde  $d$  es el día juliano.

Con datos meteorológicos de Japón, Yang *et al* (2001) determinaron que los valores de las constantes de la ecuación 2 son

$$a = 0.391, b = 0.518, c = 0.308, d = 0.320 \quad (6)$$

A continuación se determinará si dichas constantes son directamente aplicables a datos tomados en Argentina.

#### 4. APLICACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO USANDO DATOS MEDIOS MENSUALES DE ARGENTINA.

El método permite estimar los valores de irradiación de  $H_b$  y  $H_d$  efectivos *diarios*, pero el objetivo final del modelo híbrido de Yang es estimar valores medios *mensuales* de irradiación global efectiva, tal como lo expresan los autores en el resumen del trabajo original. Así, se determinaron los valores de  $H_b$  y  $H_d$  para días julianos representativos de cada mes (Klein, 1977): 17 de enero, 16 de febrero, 16 de marzo, 15 de abril, 15 de mayo, 11 de junio, 17 de julio, 16 de agosto, 15 de septiembre, 15 de octubre, 14 de noviembre y 10 de diciembre. De esta manera los valores diarios de  $H_b$  y  $H_d$  permiten estimar valores de irradiación diarios medios mensuales de  $\bar{H}_b$  y  $\bar{H}_d$  tal que

$$\begin{aligned} H_{b,d=17} &\equiv \bar{H}_{b,\text{enero}} & H_{d,d=17} &\equiv \bar{H}_{d,\text{enero}} \\ H_{b,d=47} &\equiv \bar{H}_{b,\text{febrero}} & H_{d,d=47} &\equiv \bar{H}_{d,\text{febrero}} \\ H_{b,d=75} &\equiv \bar{H}_{b,\text{marzo}} & H_{d,d=75} &\equiv \bar{H}_{d,\text{marzo}} \\ &\dots & &\dots \\ H_{b,d=344} &\equiv \bar{H}_{b,\text{diciembre}} & H_{d,d=344} &\equiv \bar{H}_{d,\text{diciembre}} \end{aligned}$$

Para estimar valores *horarios*  $\bar{\tau}_{b,i}$  y  $\bar{\tau}_{d,i}$  (con  $i=1, 2, \dots, 24$ ) se necesita conocer espesor de capa de ozono, cantidad de agua precipitable y turbidez, relacionadas con la transmitancia de ozono  $\bar{\tau}_{oz}$ , la de vapor de agua  $\bar{\tau}_w$  y la de aerosoles  $\bar{\tau}_a$ , respectivamente. Ninguna de estas magnitudes fue medida de manera directa en Argentina, pero todas ellas se pueden estimar. El espesor de capa de ozono  $l$  y cantidad de agua precipitable  $w$  se estiman usando las ecuaciones 7 y 8, respectivamente

$$l = 0.44 - 0.16 \sqrt{\left(\frac{\phi - 80}{60}\right)^2 + \left(\frac{y - 120}{263 - \phi}\right)^2} \quad (7)$$

con  $\phi$  la latitud e  $y = d$  si  $d < 300$ ,  $y = d - 366$  si  $d > 300$ .

$$w = 0.00493 \text{ HR} \cdot T^{-1} \cdot \exp(26.23 - 5416 T^{-1}) \quad (8)$$

con  $T$  temperatura (en  $^{\circ}\text{C}$ ) y  $\text{HR}$  humedad Relativa (en %). El resultado esta en cm.

Se utilizo el valor medio *anual* del coeficiente de turbidez  $\beta$  de Ångström, estimado con la ecuación

$$\bar{\beta} = (0.025 + 0.1 \cos \phi) e^{-0.7 \frac{A}{1000}} \quad (9)$$

donde  $\phi$  es la latitud y  $A$  es la altura sobre el nivel del mar, en metros. Esta expresión puede variar de acuerdo a la estación del año, en  $\pm (0.02 \sim 0.06)$ .

Los datos utilizados en el presente trabajo fueron meteorológicos, de heliofanía relativa y de irradiación global, obtenidos en las 10 localidades de la República Argentina que se detallan en la Tabla 1. Dada la gran extensión territorial de la República Argentina, se trató de abarcar la mayor cantidad posible de áreas geográficas/climáticas del país, al elegir las localidades a estudiar.

Tabla 1. Latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar de las 10 localidades consideradas en este trabajo.

Ciudad	Abreviación	Long.	Lat.	Altura s.n.m. (m.)
Abra Pampa (Jujuy)	AP	-65.85	-22.83	3484
Cerrillos (Salta)	Ce	-65.48	-24.9	1210
PRS Peña (Chaco)	PRSP	-60.4	-26.75	93
La Rioja (La Rioja)	LR	-66.82	-29.38	429
San Juan (San Juan)	SJ	-68.42	-31.57	598
Paraná (Entre Ríos)	Pa	-60.48	-31.78	78
Río Cuarto (Córdoba)	RC	-64.23	-33.12	421
Bariloche (Río Negro)	Ba	-71.17	-41.15	840
Trelew (Chubut)	Tr	-65.27	-43.2	43
Ushuaia (Tierra del Fuego)	Us	-68.32	-54.8	57

Los datos climáticos medios mensuales fueron extraídos de las páginas Web del Servicio Meteorológico Nacional y del INTA. Los datos medios mensuales de heliofanía e irradiación global para cada localidad fueron extraídos del Atlas de Energía Solar de la República Argentina (Grossi Gallegos y Righini, 2007).

Calculadas las transmitancias  $\bar{\tau}_b$  y  $\bar{\tau}_d$  se pueden estimar los valores diarios  $H_b$  y  $H_d$  como la suma de los valores *horarios* de dichas irradiaciones

$$H_b = \sum_{i=1}^{24} (I_0 \cdot \gamma)_i \cdot \bar{\tau}_{b,i} \cdot \cos \theta_{z,i} \cdot 3600 \quad (10.a)$$

$$H_d = \sum_{i=1}^{24} (I_0 \cdot \gamma)_i \cdot \bar{\tau}_{d,i} \cdot \cos \theta_{z,i} \cdot 3600 \quad (10.b)$$

usando valores horarios de  $\cos \theta_z$ . Cuando  $\theta_z < 0$  (sol por debajo del horizonte) se considera que  $\cos \theta_z = 0$ .

Queda claro entonces que el  $H_b$  y el  $H_d$  calculados con las ecuaciones 10.a y 10.b *representan* estimaciones medias mensuales de  $\bar{H}_b$  y  $\bar{H}_d$ , ya que se usaron datos medios mensuales para estimar las transmitancias difusa y directa.

Una vez que se calcularon los valores diarios de  $H_b$  y  $H_d$  representativos de los 12 meses del año, se estimó el valor de la irradiación global media mensual  $\bar{H}$  usando los valores medidos medios mensuales de heliofanía  $\bar{n}/\bar{N}$  para cada sitio y los valores de las constantes  $a, b, c, y d$  propues-

ta por Yang *et al* (2001). El valor de  $\bar{H}$  para cada mes es la suma de la irradiación directa efectiva  $\bar{H}_{b,ef}$  y de la irradiación difusa efectiva  $\bar{H}_{d,ef}$ , las que se obtienen como

$$\bar{H}_{b,ef} = (0.391 + 0.518 \frac{\bar{n}}{\bar{N}}) \bar{H}_b \quad (11.a)$$

$$\bar{H}_{d,ef} = (0.308 + 0.32 \frac{\bar{n}}{\bar{N}}) \bar{H}_d \quad (11.b)$$

## 5. RESULTADOS

Usando los valores de vapor de agua  $w$  estimados con la ecuación 8, los de ozono estimados con la ecuación 7, los de  $\beta$  estimados con la ecuación 9, se calcularon las transmitancias de las ecuaciones 3.a y 3.b, para con ellos estimar luego los valores de las componentes difusa  $H_d$  y directa  $H_b$  de la irradiación usando las ecuaciones 10.a y 10.b. La suma de estas componentes da como resultado un estimado mensual del valor de irradiación global para cielo claro.

Aplicando las ecuaciones 11.a y 11.b se determina el valor de los valores medios mensuales efectivos, los que se suman para obtener el valor de la irradiación global media mensual  $\bar{H}$ .

En la Figura 1 se aprecia el resultado logrado comparando los valores estimados (eje de las ordenadas) con los medidos (eje de las abscisas) para las 10 localidades de Argentina. También se muestra la correlación ideal,

$$(\bar{H}_{estimado} = \bar{H}_{medido}).$$

Como indicadores de dispersión se usaron el error cuadrático medio RMSE, error cuadrático medio porcentual RMSE%, error de sesgo (Media Bias Error o MBE) y error absoluto de sesgo (Media Absolute Bias Error o MABE).

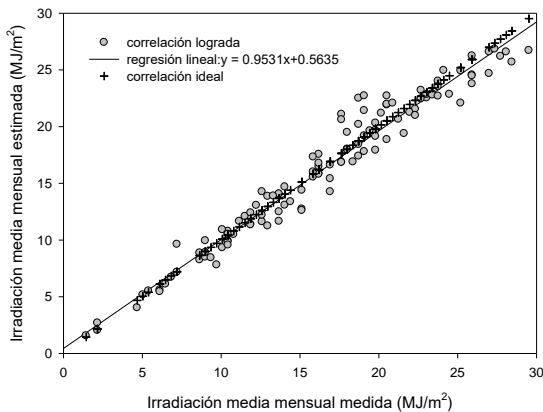


Fig. 1. Correlación entre los valores de irradiación media mensual medidos en los 10 sitios de Argentina, con los estimados usando el modelo híbrido de Yang.

El RMSE resulta 1.35 MJ/m<sup>2</sup>, lo que significa un RMSE% de 8.35%. El MBE es 0.15 MJ/m<sup>2</sup> y el MABE es 1.02 MJ/m<sup>2</sup>.

### 5.1. Error en la heliofanía.

El valor de la heliofanía relativa es un dato de entrada en el modelo híbrido de Yang. Para los datos de Argentina se determinó que el error promedio de los valores de heliofanía absoluta se encuentra entre el 5% y el 10% (Roldán *et al*, 2005). Esta situación lleva a deducir que los valores utilizados de heliofanía absoluta  $\bar{n}$  medida son inferiores al valor real. Sin embargo, y a solo efectos de realizar un análisis completo, se consideraron los valores de heliofanía absoluta originales  $\pm 10\%$  del valor medido, para el cálculo de las ecuaciones 11.a y 11.b.

Se comprobó que, respecto de los valores de heliofanía originales, **RC**, **SJ**, **Tr**, **Us**, y **Ba** mejoran sus correlaciones entre  $\bar{H}$  estimados y medidos cuando se usan las heliofanías corregidas por exceso, es decir, agregando el 10% al valor medido. **Pa**, **AP** y **PRSP** presentan las mejores correlaciones para los valores de heliofanía originales. Solo usando valores de heliofanía corregidas por defecto (menos el 10% del valor medido) las correlaciones de **Ce** y **LR** mejoran.

Aplicando estas mejoras, el RMSE ahora es 0.98 MJ/m<sup>2</sup>, por lo que el RMSE% se reduce a 5.98 %. El MBE vale -0.03 MJ/m<sup>2</sup> y el MABE es 0.73 MJ/m<sup>2</sup>. Pero debe tenerse en cuenta la consideración mencionada al principio de este párrafo: la heliofanía medida sería inferior a la real.

### 5.2. Diferencia en los valores de irradiación difusa respecto de los esperados usando la ecuación de Erbs.

En esta etapa se determinó si los valores estimados de irradiación efectiva  $\bar{H}_{d,ef}$  resultaban ser representativos o no. Dado que no existen datos de radiación solar difusa medidos en alguna de las localidades estudiadas, se utilizó el modelo de Erbs *et al* (1982) para estimarlos. Las ecuaciones de Erbs estiman fracción difusa media mensual a partir de valores medios mensuales de índice de claridad, para  $\omega_s \leq 81.4^\circ$  y  $0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8$ , como

$$K_{d,E} = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.56\bar{K}_T + 4.18\bar{K}_T^2 - 2.13\bar{K}_T^3 \quad (12.1)$$

y para  $\omega_s > 81.4^\circ$  y  $0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8$ , como

$$K_{d,E} = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.02\bar{K}_T + 3.42\bar{K}_T^2 - 1.82\bar{K}_T^3 \quad (12.2)$$

con  $\bar{K}_T$  el índice de claridad medio mensual, igual a  $\bar{H}/\bar{H}_0$ .

La *diferencia* entre el valor de la irradiación difusa efectiva estimada por Yang y las estimadas por Erbs brinda una idea del grado de consistencia de la estimación del primer modelo. Para comparar los valores de irradiación difusa efectiva se consideró la Diferencia Porcentual Promedio (DDP), calculada como

$$DPP = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{\bar{H}_{d,Ei} - \bar{H}_{d,Yi}}{\bar{H}_{d,Ei}} \right) \cdot 100, \text{ con } i = 1(\text{ene}), \dots, 12(\text{dic}) \quad (13)$$

entre los valores de irradiación difusa efectiva estimados con la ecuación de Erbs,  $\bar{H}_{d,Ei}$ , y los estimados (efectivos) con Yang,  $\bar{H}_{d,Yi}$ . El valor  $\bar{H}_{d,Ei}$  se calcula como  $\bar{H}_{d,Ei} = K_{d,Ei} \cdot \bar{H}_i$ , donde  $\bar{H}_i$  es el  $i$ -ésimo valor *estimado* de irradiación global. Esta información se muestra en la Tabla 2

Tabla 2. Comparación entre los valores de RMSE, RMSE% y DPP considerando las heliofanías originales y las corregidas, para los 10 sitios analizados. Están sombreados los valores que minimizan el RMSE%, es decir, los que mejor correlacionan los valores de irradiación estimados y medidos.

Sitio	n+10%			n originales			n-10%		
	RMSE	RMSE%	DPP	RMSE	RMSE%	DPP	RMSE	RMSE%	DPP
RC	0.51	<b>3.12</b>	<b>34.80</b>	0.94	5.97	37.58	1.54	10.27	40.17
SJ	1.23	<b>6.39</b>	<b>27.7</b>	2.07	11.22	32.4	2.97	16.88	36.54
Tr	0.55	<b>3.59</b>	<b>15.85</b>	1.00	6.78	19.83	1.65	11.74	23.51
Pa	1.05	6.04	<b>22.69</b>	0.6	<b>3.57</b>	26.41	0.89	5.56	29.84
Ce	1.83	10.41	<b>54</b>	1.27	7.43	56	0.86	<b>5.27</b>	57.84
LR	2.93	16.52	<b>31.94</b>	2.5	13.26	35.36	1.65	<b>10.14</b>	38.50
Us	1.34	<b>13.60</b>	<b>26.69</b>	1.48	15.53	28.50	1.68	18.15	29.98
PRSP	0.98	5.65	<b>28.22</b>	0.7	<b>4.17</b>	31.37	1.04	6.49	34.30
AP	1.30	5.66	<b>70.76</b>	0.44	<b>1.99</b>	74	1.03	<b>4.95</b>	76.46
Ba	0.42	<b>2.55</b>	<b>38.22</b>	0.96	6.12	41.3	1.72	11.48	44.08

Puede apreciarse que la DPP entre  $\bar{H}_{d,E}$  y  $\bar{H}_{d,Y}$  es menor cuando se considera una mayor cantidad de horas de sol brillando: al aumentar el valor de  $\bar{n}/\bar{N}$ , aumenta el valor de la irradiación difusa efectiva  $\bar{H}_{d,Y}$ , acercándose entonces al valor esperado  $\bar{H}_{d,E}$ . Queda en evidencia lo que se suponía sobre el error en la heliofanía ya que la mitad de los sitios mejora sus estimaciones al considerar heliofanías corregidas por exceso.

5.3. Error en el índice medio anual de turbidez  $\beta$  de Ångström.

Resta considerar el error al usar el valor estimado medio anual de índice de turbidez  $\beta$  de Ångström. Para ello se realizó un análisis para RC, Pa, PRSP y LR, variando por exceso y por defecto el valor medio anual estimado por Yang. Se consideraron dos valores extremos arbitrarios para  $\beta$  (0.22 y 0.01). Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 3.

En las figuras 2.a y 2.b se muestra la distribución, en ejes cartesianos, de los valores de RMSE% y DPP de la Tabla 3.

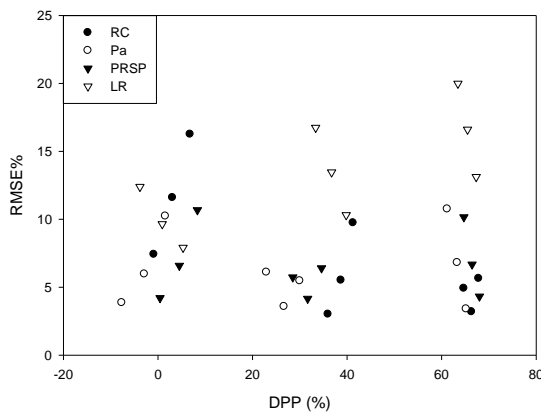


Fig. 2.a RMSE% y DPP de RC, Pa, PRSP y LR variando el valor del índice de turbidez medio anual estimado por Yang. En el centro se ubican los puntos con  $\beta$  medio anual estimado por Yang.

dos por Yang. De cada localidad, para cada  $\beta$ , hay tres puntos, correspondientes a las heliofanías corregidas y la original.

Tabla 3. Comparación de RMSE% y DPP para RC, Pa, PRSP y LR variando la heliofanía y el índice de turbidez  $\beta$ . Están sombreados los datos considerando heliofanía corregida por exceso, que es la que se considera más cercana a la realidad. Los valores de RMSE% mínimos están resaltados en negrita

	$\beta$	0.01		0.08		0.22	
		RMSE%	DPP	RMSE%	DPP	RMSE%	DPP
RC	n/N						
	+10%	4.68	64.58	<b>3.12</b>	<b>34.80</b>	8.09	-2.80
	O	3.06	66.21	5.97	37.58	12.33	1.18
	-10%	5.94	67.72	10.27	40.17	17.04	4.95
Pa	n/N						
	+10%	10.71	61.18	6.04	22.69	<b>3.87</b>	<b>-8.00</b>
	O	6.76	63.28	3.57	26.41	6.08	-3.22
	-10%	3.38	65.17	5.56	29.84	10.36	1.24
PRSP	n/N						
	+10%	10.16	64.71	5.73	28.52	<b>4.21</b>	<b>0.44</b>
	O	6.68	66.43	4.16	31.66	6.59	4.51
	-10%	4.32	68	6.4	34.59	10.68	8.34
LR	n/N						
	+10%	19.91	63.24	16.52	31.94	<b>12.07</b>	<b>-6.1</b>
	O	16.53	65.28	13.26	35.36	9.41	-1.32
	-10%	13.05	67.11	10.14	38.5	7.86	3.14

Idealmente los puntos representativos deberían estar concentrados alrededor del valor DPP = 0 y por debajo de 5 % para RMSE%, ya que esa manera se tendrían valores de irradiación difusa consistente con el modelo de Erbs ( $\bar{H}_{d,E} \approx \bar{H}_{d,Y}$ ) y a las vez consistentes con el modelo de Yang ( $\bar{H}_{estimado} \approx \bar{H}_{medido}$ ). Un error igual o menor al 5% en el RMSE% se considera aceptable.

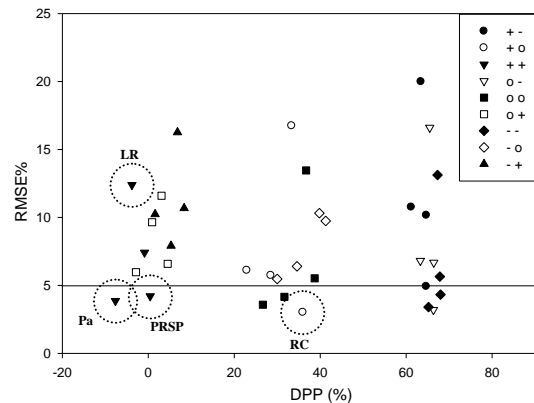


Fig. 2.b Discriminación de los datos de la Fig. 2.a, según n/N y  $\beta$ . El primer signo indica el tipo de heliofanía usada (+=corregida por exceso, o=original y -=corregida por defecto). El segundo signo indica el tipo de índice de turbi-

dez (+ = superior al estimado por Yang., o = estimado por Yang y - = inferior al estimado por Yang). Están resaltados los valores mínimos del RMSE% de la Tabla 3.

En la figura 2.a se aprecia que valores altos de  $\beta$  aproximan los puntos a DPP = 0, pero los RMSE% tienden a aumentar. En la figura 2.b se discrimina por heliofanía e índice de turbidez, observándose que considerar valores originales de heliofanía y de índice de turbidez (símbolo ■) ubica las estimaciones en una región distinta de la esperada para el DPP. Se han encerrado en círculos de línea punteada los valores resaltados en negrita en la Tabla 3, es decir, aquellos que cumplen con minimizar el RMSE% para heliofanías corregidas por exceso.

## 6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Las variables de ajuste que se consideraron en la determinación del valor de la irradiación media mensual estimada por el modelo híbrido de Yang fueron heliofanía e índice de turbidez. Como ya se dijo, el valor real de heliofanía absoluta media mensual medida en cada sitio está más próximo al valor medido de heliofanía absoluta más el 10%, ya que los heliógrafos casi siempre miden con error por defecto. Así, en esta etapa la única variable de ajuste a considerar es el índice de turbidez  $\beta$  de Ångström, en su valor medio anual.

De los valores estimados en la Tabla 3 podemos observar que en **Pa**, **PRSP** y **LR** los valores de índice de turbidez  $\beta$  medios anuales que minimizan el RMSE% están alejados de los estimados según Yang: los RMSE% son menores para valores cercanos a  $\beta = 0.22$ . Para este caso, y para todos los demás, el RMSE% es el indicador de error determinante (superior al DPP). Por esta razón se concluye que el valor del índice de turbidez medio anual para **RC** está próximo al valor estimado por Yang, ya que el RMSE% es menor para  $\beta = 0.08$  (3.12%) que para  $\beta = 0.22$  (8.09%), mientras que para **Pa**, **PRSP** y **LR** el índice de turbidez medio anual sería superior al estimado por Yang. Para estos últimos tres sitios, la diferencia entre los RMSE% obtenidos considerando el  $\beta$  de Yang y el corregidos resulta ser, en promedio, de 3%.

Nótese que la DPP de **RC** para el caso  $\beta = 0.08$  (34.80%) es mayor que para  $\beta = 0.22$  (-2.80%). Esto indica que existe un error importante en el valor estimado de radiación difusa efectiva en **RC**. Ese error puede deberse a valores erróneos en la cantidad considerada de agua precipitable  $w$  (téngase en cuenta que el valor de  $w$  se estimó a partir de datos de temperatura y de humedad relativa). Si se disminuye el valor de  $w$ , aumenta el valor de  $\beta$ , incrementando la cantidad estimada de radiación difusa, acercándose a los valores esperados según Erbs.

Si disminuye la cantidad de vapor de agua, se tendrá una menor contribución en la atenuación por esta causa, teniendo que asignar la mayor parte de la atenuación al efecto dispersivo de los aerosoles, para que la irradiación global efectiva media mensual estimada alcance el valor medido de irradiación media mensual.

## 7. CONCLUSIONES

Se ha aplicado el modelo híbrido de Yang a datos registrados en 10 localidades de la República Argentina, estableciéndose que los valores de las constantes de regresión pro-

puestas permiten realizar una estimación muy buena de los valores medio mensuales de irradiación global.

El uso de valores de heliofanía absoluta corregidas por exceso (10% del valor medido), de temperatura y humedad relativa media mensual para la estimación de la cantidad de agua precipitable, las formulas de Yang para estimar espesor de ozono e índice medio anual de turbidez de Ångström, y los valores de las constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  de Yang, permiten realizar una buena estimación del valor de irradiación global horizontal medio mensual, con un RMSE% igual a 8.35% y un MBE de 0.15 MJ/m<sup>2</sup>.

Este método debe seguir siendo estudiado, para Argentina, a fin de poder estimar valores de variables relacionadas a las transmitancias de componentes atmosféricos, los que no pueden establecerse de manera directa por falta de datos medidos. También deben determinarse los rangos de errores en estas variables, a fin de determinar la idoneidad del modelo para Argentina.

## 8. APÉNDICE A: ECUACIONES PARA ESTIMAR LAS TRANSMITANCIAS DIRECTA Y DIFUSA EN EL MODELO HÍBRIDO DE YANG

$$\bar{\tau}_{oz} = \exp(-\ln \bar{k}_{oz}) \quad (A.1)$$

$$\bar{\tau}_w = \exp(-\bar{c}_w) \quad (A.2)$$

$$\bar{\tau}_g = \exp(-\bar{c}_g) \quad (A.3)$$

$$\bar{\tau}_r = \exp(-0.008735 \bar{\lambda}_r^{-4.08} P/P_0) \quad (A.3)$$

$$\bar{\tau}_a = \exp(-\beta m \bar{\lambda}_a^{-1.3}) \quad (A.4)$$

donde

$$\bar{k}_{oz} = 0.0365 (\text{ml})^{-0.2864} \quad (A.5)$$

$$\bar{c}_w = -\ln[0.909 - 0.036 \ln(mw)] \quad (A.6)$$

$$\bar{c}_g = 0.0117 m^{0.3139} \quad (A.7)$$

$$\bar{\lambda}_r = 0.547 + 0.014(mP/P_0) - 0.00038(mP/P_0)^2 + 4.6 \times 10^{-6} (mP/P_0)^3 \quad (A.8)$$

$$\bar{\lambda}_a = 0.6777 + 0.1464(m\beta) - 0.00626(m\beta)^2 \quad (A.9)$$

## REFERENCIAS

- Akinoglu B. G., A. Ecevit (1990). Construction of a quadratic model using modified Ångstrom coefficients to estimate global solar radiation. *Solar Energy* **45**, 2, 85-92.
- Ångström A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **50**, 121-125.
- Erbs D.G., S. A. Klein y J.A. Duffie (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily, and monthly average global radiation. *Solar Energy* **28**, 293.
- Gopinathan K.K. (1988). A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global so-

- lar radiation to sunshine duration. *Solar Energy* **41**, 499–502.
- Grossi Gallegos H., R. Righini (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Luján – SECYT.
- Gueymard C. A. (2003). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* **74**, 355-379.
- Gueymard C. A., D. Renné y F. E. Vignola (2009) Editorial: Journal's performance and publication criteria. *Solar Energy* **83**,1,1-1
- Gueymard, C. (1993). Analysis of monthly average solar radiation and bright sunshine for different thresholds at Cape Canaveral, Florida. *Solar Energy* **51**, 139-145
- Hinrichsen K. (1994). The Ångström formula with coefficients having a physical meaning. *Solar Energy* **52**, 6.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. [www.inta.gov.ar](http://www.inta.gov.ar)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- Iqbal M. (1979). Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine. *Solar Energy* **23**, 169–174.
- Klein S. A. (1977). Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* **19**, 325-319.
- Leckner B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface-elements of a model. *Solar Energy* **20**, 143–150.
- Ma C.C.Y., M. Iqbal (1984). Statistical comparison of solar radiation correlations. Monthly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces. *Solar Energy* **33**, 2, 143-148
- Mani A., S. Rangarajan (1983). Techniques for the precise estimation of hourly values of global, diffuse and direct solar radiation. *Solar Energy* **31**, 6, 577-595.
- Prescott J.A. (1940). Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Trans. Roy. Soc. Austr.* **64**, 114.
- Rietveld M. R. (1978). A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine". *Agri. Meteorol.* **19**, 243-252
- Righini R., H. Grossi Gallegos, C. Raichijk (2005) Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy* **30**, 8, 1241-1255.
- Roldán A., R. Righini1, H. Grossi Gallegos (2005). Análisis preliminar del comportamiento de fajas de heliógrafos utilizadas en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **9**.
- Servicio Meteorológico Nacional. [www.smn.gov.ar](http://www.smn.gov.ar)
- SSE. Surface meteorology and Solar Energy. [eosweb.larc.nasa.gov/sse](http://eosweb.larc.nasa.gov/sse)
- SWERA - Data for Solar and Wind Renewable Energy. [swera.unep.net/index.php?id=solar](http://swera.unep.net/index.php?id=solar)
- Xu S. Z. (1993). Fundamental of Atmospheric Physics. Meteorology Press, Beijing (China)
- Yang K., G. W. Huang, N. Tamai (2001). A hibrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy* **70**, 1, 13–22