

CORRELACIONES EMPÍRICAS DE LA IRRADIACIÓN SOLAR NORMAL DIRECTA CON LA HELIOFANÍA EFECTIVA

C. Raichijk, H. Grossi Gallegos

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

RESUMEN: En el presente trabajo se evalúa la posibilidad de correlacionar la irradiación solar normal directa con las horas de brillo solar o heliofanía efectiva en dos localidades ubicadas en diferentes regiones climáticas: Ushuaia, Argentina, y Botucatu, en el estado de San Pablo, Brasil. Se cuenta para ello con datos medios mensuales simultáneos de irradiación solar normal directa y heliofanía efectiva para distintos períodos: 1995-2000 en Ushuaia y 1996-2005 en Botucatu. Se estudió dos tipos de correlaciones: $\overline{H_{bn}} = \hat{f}(\bar{n})$ y $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = \hat{f}(\bar{n}/\bar{N})$ encontrándose en todos los casos un buen nivel de ajuste para regresiones lineales. Al evaluar las distintos modelos se han obtenido errores cuadráticos medios relativos de 14.8%-13.8% en Ushuaia y de 12.4%-13% en Botucatu, mostrándose todas las correlaciones insesgadas. Se determinaron también, con buen nivel de ajuste, correlaciones lineales comunes a ambas estaciones, los errores cuadráticos medios relativos hallados para estas últimas son del orden de 13.6%.

Palabras clave: Correlaciones, radiación solar normal directa, heliofanía efectiva, Ushuaia, Botucatu.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la componente directa de incidencia normal de la irradiación solar que llega a la superficie terrestre es de suma importancia al dimensionar sistemas aplicados de aprovechamiento de la energía solar basados en la utilización de colectores concentradores. Sin embargo son muy escasos los registros sistemáticos de datos de tierra tanto de la componente difusa, medida usando una banda sombreadora, como de la componente directa determinada a partir del empleo de pirheliómetros. Es por ello que se recurre a las llamadas correlaciones de descomposición, definidas por lo general para la fracción difusa, las que permiten a partir de la irradiación global sobre plano horizontal calcular la componente difusa de la misma y luego por diferencia entre ambas estimar la directa (Raichijk et al., 2008). Estas correlaciones se obtienen al ajustar empíricamente la fracción difusa respecto a diferentes variables, siendo el índice de claridad, la heliofanía relativa o una combinación lineal de ambas las más frecuentes.

Como ejemplo de correlaciones para valores medios mensuales de la fracción difusa en función del índice de claridad cabe destacar los trabajos pioneros de Liu y Jordan (1960) y Page (1961). Iqbal (1979) estableció correlaciones para la fracción difusa de primer y segundo grado respecto a la heliofanía relativa media mensual, El-Sebaei et al. (2003) y Haydar et al. (2006) evaluaron a su vez correlaciones de hasta tercer grado también respecto a la heliofanía relativa y Gopinathan y Soler (1995) analizaron la posibilidad de establecer ajustes lineales múltiples en función del índice de claridad y la heliofanía relativa. En un trabajo reciente (Raichijk et al., 2009) se convalidó para la ciudad de San Luis distintos modelos de descomposición para la fracción difusa de amplia difusión en la literatura, definidos en base horaria, diaria y diaria media mensual. Se encontró que, tanto la correlación lineal simple respecto a la heliofanía relativa media mensual propuesta por Iqbal (1979) como las correlaciones múltiples de Gopinathan y Soler (1995), en función del índice de claridad y la heliofanía relativa medios mensuales, presentan una buena respuesta, con desvíos medios relativos del orden de 12-13%. Con anterioridad Grossi Gallegos et al. (2003) en San Miguel y Grossi Gallegos et al. (2006) en Ushuaia pudieron verificar que es posible expresar linealmente la relación entre la fracción difusa y el índice de claridad medios mensuales.

Por otro lado, distintos autores han establecido empíricamente correlaciones para lo que se podría definir como el índice de claridad medio mensual de la componente directa, es decir el cociente $\overline{H_b}/\overline{H_o}$, siendo $\overline{H_b}$ la irradiación directa media mensual y $\overline{H_o}$ la irradiación a tope de atmósfera media mensual, ambas sobre plano horizontal. Con datos de 3 estaciones canadienses Iqbal (1979) estableció correlaciones de segundo grado para este cociente respecto a la heliofanía relativa media mensual. Benson et al. (1984) en Atlanta (EE. UU) evaluaron también la correlación del índice de claridad medio mensual de la componente directa de incidencia normal, $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}}$, con la heliofanía relativa media mensual. Louche et al. (1991) a partir de información obtenida en Ajaccio (Francia) y Power (2001a) utilizando datos de Uccle (Bélgica), Albany (EE. UU.) y Vancouver (Canadá), estudiaron por su parte la siguiente correlación:

$$\overline{H_{bn}}/\overline{H_{bnc}} = a + b * (\overline{n}/\overline{N}) \quad (1)$$

donde $\overline{H_{bn}}$ es la irradiación normal directa media mensual, $\overline{H_{bnc}}$ la irradiación normal directa potencial de cielo claro media mensual y $(\overline{n}/\overline{N})$ la heliofanía relativa media mensual, siendo $\overline{H_{bnc}}$ estimada mediante el empleo de los modelos parametrizados de cielo claro de Louche *et al.* (1987) y Power (2001b) respectivamente. En ambos trabajos el coeficiente “a” es cercano a cero (Ajaccio=0.006; Uccle=-0.037; Albany=0.076 y Vancouver=0.09) y “b” a 1 (Ajaccio=0.991; Uccle=1.002; Albany=0.867 y Vancouver=0.828).

Stanhill (1998) correlaciona directamente la irradiación normal directa media mensual, $\overline{H_{bn}}$, con las horas de brillo solar o heliofanía efectiva media mensual, \overline{n} , en dos localidades con distintas medias de radiación y condiciones climáticas. Con una base de 191 casos en una estación de Israel y de 192 en otra de Irlanda, establece correlaciones lineales con errores medios relativos de 9.1%-12.1% y coeficientes de determinación, R^2 , iguales a 0.96 y 0.91 respectivamente. A su vez, analiza correlaciones comunes a ambas estaciones tanto de tipo lineal como cuadrática, obteniendo para el caso lineal una regresión, expresada en MJ/m², igual a $\overline{H_{bn}} = 2.209 \overline{n} - 0.955$, con un error medio relativo de 11% y un $R^2 = 0.97$.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la posibilidad de establecer empíricamente en dos localidades con distintas condiciones climáticas como Ushuaia de Argentina y Botucatu del estado de San Pablo, Brasil, las siguientes correlaciones: $\overline{H_{bn}}$ en función de \overline{n} y $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{On}}$ con respecto a $(\overline{n}/\overline{N})$.

MATERIALES Y MÉTODO

Se utilizaron datos de irradiación solar normal directa obtenidos mediante pirheliómetros de incidencia normal (NIP) de marca Eppley ubicados en las siguientes localidades y estaciones de medición: Ushuaia, Estación de Vigilancia Atmosférica Global-VAG (GAW-Global Atmosphere Watch) y Botucatu, Estación de Radiometría Solar de la Universidad Estadual Paulista (UNESP). Los valores medios mensuales empleados de $\overline{H_{bn}}$ correspondientes a Botucatu son los que se publican en Nardini Gomes et al. (2008). Los datos de heliofanía efectiva de Ushuaia fueron suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y los de Botucatu por el Dr. J. F. Escobedo. En la Tabla 1 se consignan las ubicaciones geográficas de las estaciones de medición consideradas, el período de cada base de datos y el número de casos con valores medios mensuales simultáneos de irradiación solar normal directa y heliofanía efectiva empleados al establecer las distintas correlaciones.

estaciones	Lat (°)	Long (°)	Altura (m)	Período de medición	Nº de casos
Ushuaia	-54.80	-68.27	18	1995-2000	56
Botucatu	-22.85	-48.45	786	1996-2005	118

Tabla 1: Ubicación geográfica, período de medición y número de casos considerado en las estaciones de Ushuaia (Argentina) y Botucatu (Brasil).

Cabe destacar que las dos estaciones de medición consideradas se encuentran ubicadas en distintas regiones climáticas y ámbitos geográficos. La estación de Ushuaia se encuentra frente al Canal de Beagle, su clima es Subpolar Oceánico, con temperaturas medias en verano que no superan los 10°C y promedian 1°C en invierno, sin estación seca con cobertura nubosa casi permanente y precipitaciones anuales totales de 500-600 mm, bajas para un clima húmedo. Por su parte, la Estación Radiométrica de Botucatu se ubica en un ámbito rural, su clima según la clasificación de Köppen es Cwa, templado mesotérmico, con veranos calientes y húmedos e inviernos secos, enero es el mes con mayores precipitaciones (260 mm) y cobertura nubosa (60%) y agosto con los índices más bajos (38 mm y 27%). Los meses de febrero y julio presentan las temperaturas medias más altas y bajas del año, con valores de 23.2 °C y 17.1°C respectivamente.

Las medias mensuales del número astronómico de horas de sol, \overline{N} , se estima para el día medio de cada mes. La irradiación a tope de atmósfera de incidencia normal media mensual, $\overline{H_{On}}$, se define como

$$\overline{H_{On}} = I_{cs} * \epsilon * \overline{N} \quad (2)$$

donde $I_{cs} = 1367 \text{ W/m}^2$ es la constante solar y ϵ la corrección mensual a la distancia media Sol-Tierra.

Como estimadores de cada modelo se determinarán el error cuadrático medio RMSE (root mean square error), el sesgo medio MBE (mean bias error) y el índice de ajuste “d” de Willmott (1981):

$$\text{RMSE} = n^{-1} * \left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\text{MBE} = n^{-1} * \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i'| + |O_i'|)^2} \quad (5)$$

donde O_i es el valor observado, P_i el estimado por el modelo, $|O_i'|$ el valor absoluto de la diferencia $O_i - \bar{O}$, $|P_i'|$ el valor absoluto de la diferencia $P_i - \bar{O}$ (siendo \bar{O} el valor medio de las observaciones) y n el número de casos considerado. El índice “d” varía entre 0 y 1 e indica el nivel de ajuste entre dos variables, en este caso entre el valor estimado y el medido.

RESULTADOS

En las Figuras 1 y 2 se muestran para las estaciones de Ushuaia y Botucatu respectivamente los gráficos \bar{H}_{bn} vs. \bar{n} y $\bar{H}_{bn}/\bar{H}_{on}$ vs. (\bar{n}/\bar{N}) y el coeficiente de determinación, R^2 , correspondiente a cada curva lineal de ajuste hallada.

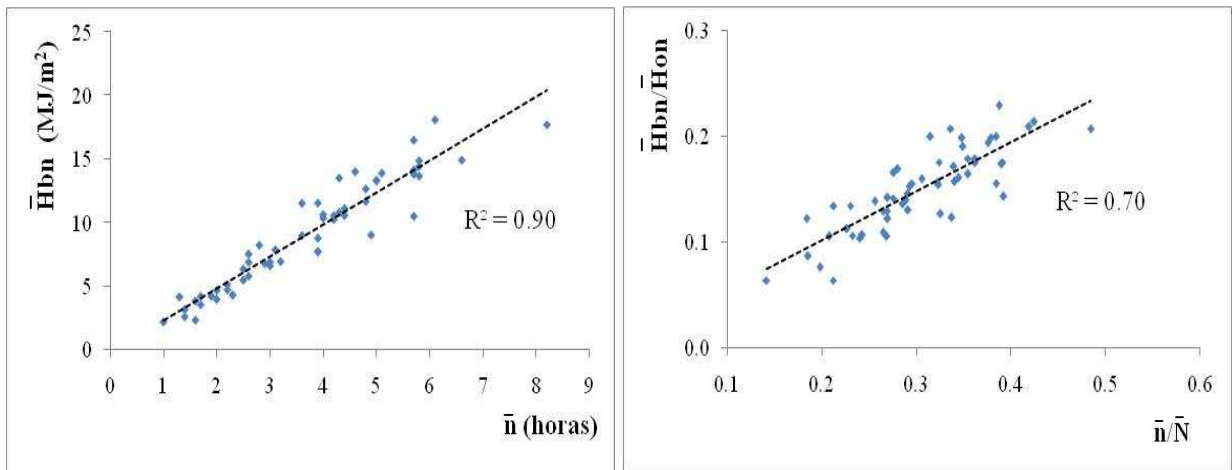


Figura 1: Gráficos \bar{H}_{bn} vs. \bar{n} y $\bar{H}_{bn}/\bar{H}_{on}$ vs. (\bar{n}/\bar{N}) en Ushuaia.

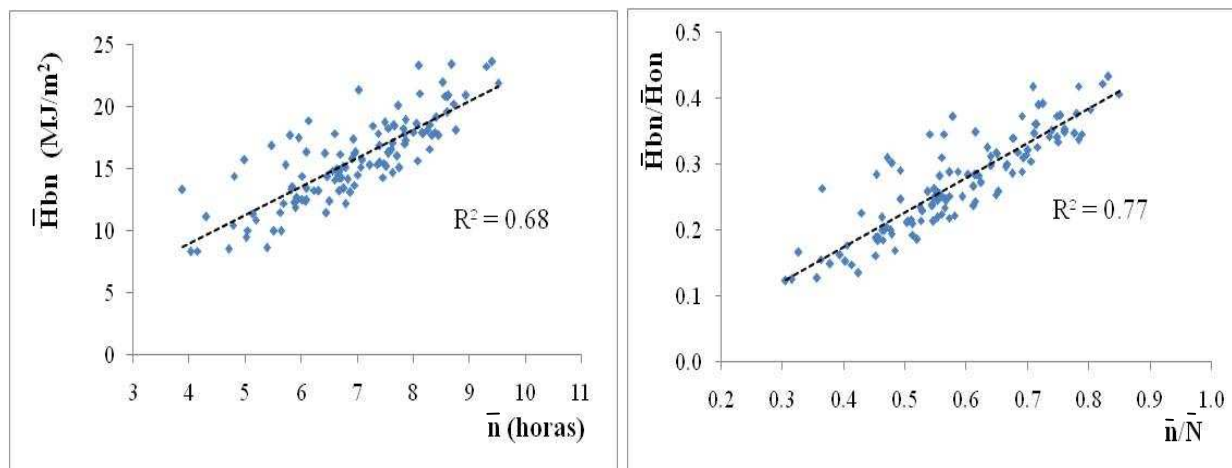


Figura 2: Gráficos \bar{H}_{bn} vs. \bar{n} y $\bar{H}_{bn}/\bar{H}_{on}$ vs. (\bar{n}/\bar{N}) en Botucatu.

Las correlaciones obtenidas en cada estación son las siguientes:

- Ushuaia, para $1 \leq \bar{n} \leq 8.2$,

$$\overline{H_{bn}} = -0.266 + 2.526 * \bar{n} \quad \text{en MJ/m}^2 \quad (6)$$

$$\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = 0.008 + 0.464 * (\bar{n}/\bar{N}) \quad (7)$$

- Botucatu, para $3.9 \leq \bar{n} \leq 9.5$,

$$\overline{H_{bn}} = -0.299 + 2.304 * \bar{n} \quad \text{en MJ/m}^2 \quad (8)$$

$$\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = -0.034 + 0.522 * (\bar{n}/\bar{N}) \quad (9)$$

En la Tabla 2 se consignan, para las correlaciones $\overline{H_{bn}} = f(\bar{n})$ encontradas, los valores de los estimadores estadísticos que se han elegido para poder evaluarlas. En la Tabla 3, lo mismo respecto a las correlaciones $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = f(\bar{n}/\bar{N})$.

estaciones	R ²	RMSE (MJ/m ²)	MBE (MJ/m ²)	d-Willmott	Valor medio de $\overline{H_{bn}}$ (MJ/m ²)
Ushuaia	0.90	1.34	2 E-15	0.97	9.1
Botucatu	0.68	1.94	-2.8 E-15	0.90	15.7

Tabla 2: Estimadores estadísticos de evaluación de las correlaciones $\overline{H_{bn}} = f(\bar{n})$.

estaciones	R ²	RMSE	MBE	d-Willmott	Valor medio de $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}}$
Ushuaia	0.70	0.02	-6 E-17	0.91	0.15
Botucatu	0.77	0.04	-9.4 E-19	0.93	0.27

Tabla 3: Estimadores estadísticos de evaluación de las correlaciones $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = f(\bar{n}/\bar{N})$.

Teniendo en cuenta los errores de estimación de los coeficientes de las distintas regresiones lineales establecidas (en la Tabla 4 se muestran los valores de los coeficientes y sus respectivos errores) se advierte que los intervalos de estimación de los mismos, con un nivel de confianza del 95%, se intersectan. Esto permitiría definir correlaciones comunes a ambas bases de datos. En la Figura 3 se muestra los gráficos $\overline{H_{bn}}$ vs. \bar{n} y $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}}$ vs. (\bar{n}/\bar{N}) para el conjunto de datos de las estaciones de Ushuaia y Botucatu.

estaciones	correlación $\overline{H_{bn}} = f(\bar{n})$		correlación $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = f(\bar{n}/\bar{N})$	
	ordenada (MJ/m ²)	pendiente (MJ/m ² hora)	ordenada	pendiente
Ushuaia	-0.266±0.462	2.526±0.115	0.008±0.013	0.464±0.041
Botucatu	-0.299±1.042	2.304±0.148	-0.034±0.016	0.522±0.026

Tabla 4: Valores de los coeficientes de las correlaciones lineales halladas en las distintas estaciones.

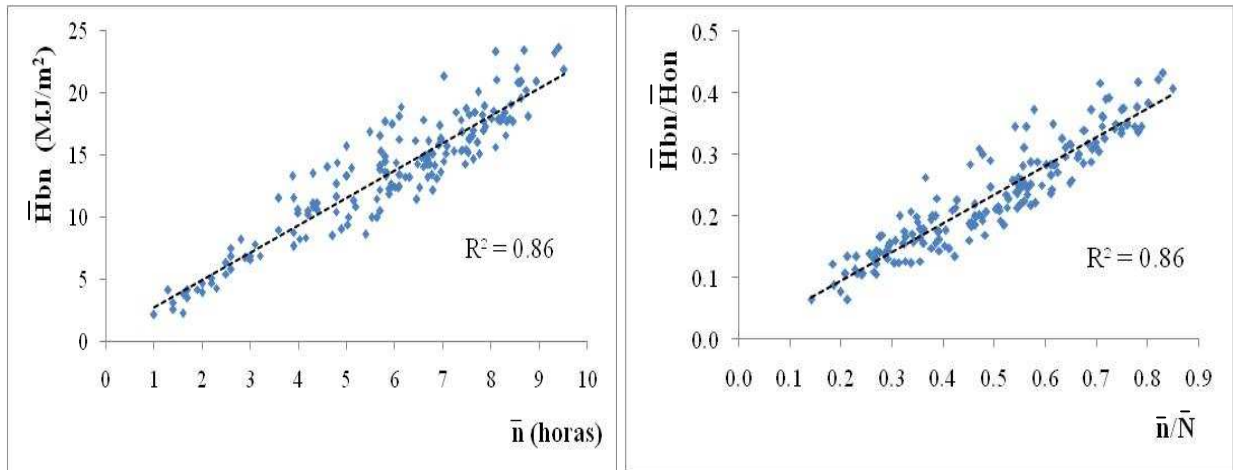


Figura 3: Gráficos $\overline{H_{bn}}$ vs. \bar{n} y $\overline{H_{bn}/H_{on}}$ vs. (\bar{n}/\bar{N}) para el conjunto de datos de las estaciones de Ushuaia y Botucatu.

Las correlaciones lineales comunes halladas, para $1 \leq \bar{n} \leq 9.5$, son las siguientes:

$$\overline{H_{bn}} = 0.583 + 2.201 * \bar{n} \quad \text{en MJ/m}^2 \quad (10)$$

$$\overline{H_{bn}/H_{on}} = 0.001 + 0.467 * (\bar{n}/\bar{N}) \quad (11)$$

En las Tablas 5 y 6 se consignan los valores de los estimadores estadísticos de evaluación de las respectivas correlaciones comunes y en la Tabla 7 los valores de los coeficientes con sus correspondientes errores de estimación.

R^2	RMSE (MJ/m ²)	MBE (MJ/m ²)	d-Willmott	Valor medio de $\overline{H_{bn}}$ (MJ/m ²)
0.86	1.81	1.9 E-15	0.96	13.6

Tabla 5: Estimadores estadísticos de evaluación de la correlación común $\overline{H_{bn}} = f(\bar{n})$.

R^2	RMSE	MBE	d-Willmott	Valor medio de $\overline{H_{bn}/H_{on}}$
0.86	0.03	4.8 E-17	0.96	0.23

Tabla 6: Estimadores estadísticos de evaluación de la correlación común $\overline{H_{bn}/H_{on}} = f(\bar{n}/\bar{N})$.

correlación $\overline{H_{bn}} = f(\bar{n})$		correlación $\overline{H_{bn}/H_{on}} = f(\bar{n}/\bar{N})$	
ordenada (MJ/m ²)	pendiente (MJ/m ² hora)	ordenada	pendiente
0.583±0.425	2.201±0.068	0.001±0.008	0.467±0.014

Tabla 7: Valores de los coeficientes de las correlaciones lineales comunes.

CONCLUSIONES

Se han estudiado en dos localidades ubicadas en distintas regiones climáticas dos correlaciones posibles entre la irradiación solar normal directa y la heliofanía efectiva: $\overline{H_{bn}} = \hat{f}(\bar{n})$ y $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = \hat{f}(\bar{n}/\bar{N})$. En todos los casos se ha logrado definir con un buen nivel de ajuste regresiones de tipo lineal. Al evaluar las distintos modelos se han encontrado errores cuadráticos medios relativos de 14.8%-13.8% en Ushuaia y de 12.4%-13% en Botucatu, mostrándose insesgadas todas las correlaciones. Se observa que las regresiones lineales $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = \hat{f}(\bar{n}/\bar{N})$ presentan coeficientes independientes prácticamente iguales a cero. Se pudo establecer regresiones lineales comunes a ambas estaciones, con coeficientes de determinación $R^2=0.86$ y errores cuadráticos medios relativos del orden de 13.6%. Para la correlación común $\overline{H_{bn}} = \hat{f}(\bar{n})$ la pendiente es similar a la hallada por Stanhill (1998) al analizar en conjunto dos estaciones de Israel e Irlanda pero con un término independiente distinto y, en nuestro caso, positivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean formular su agradecimiento al Dr. J. F. Escobedo del Departamento de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UNESP, Brasil, y al Dr. S. Wilcox del National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los EE.UU. de Norteamérica por facilitar la información utilizada en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Benson R. B., Paris M.V., Sherry J. E. and Justus C. G. (1984) Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global solar radiation from sunshine duration measurements. *Solar Energy* 32, 4, 523–535.
- El-Sebaï AA, Trabea AA. (2003) Estimation of horizontal diffuse solar radiation in Egypt. *Energy Convers Manage* 44, 15, 2471–2482.
- Gopinathan K. y Soler A. (1995) Diffuse radiation models and monthly-average, daily, diffuse data for a wide latitude range. *Energy* 20, 7, 657-667.
- 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 radiación solar disponibles en Ushuaia, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, 11.09-11.14 versión CD-ROM.
- Haydar A, Balli O, Hepbasli A. (2006) Estimating the horizontal diffuse solar radiation over the Central Anatolia region of Turkey. *Energy Convers Manage* 47, 15-16, 2240–2249.
- Iqbal M. (1979) Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine. *Solar Energy* 23, 169 -173.
- Liu B. and Jordan R. (1960) The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 4, 3, 1–19.
- Louche A., Maurel M., Simonnot G., Peri G. and Iqbal M. (1987) Determination of Ångström's turbidity coefficient from direct total solar irradiance measurements. *Solar Energy* 38, 2, 89–96.
- Louche A., Notton G., Poggi P. and Simonnot G. (1991) Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. *Solar Energy* 46, 4, 261–266.
- Nardini Gomes E., Escobedo J. F., Pereira de Oliveira A., Soares J. (2008) Séries diurna e anual da radiação direta na incidência normal em Botucatu, período de 1996 a 2005. En *Anais do II Congresso Brasileiro de Energia Solar – III Conferencia Latinoamericana de la ISES, Florianópolis, SC, Brasil, ISBN CD 978-85-62179-00-6*.
- Page J. (1961) The estimation of monthly mean values of daily total shortwave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitude 40°N–40°S. En *Proceedings of the UN conference on new sources of energy. Paper no S98, vol. 4, 378–90*.
- Power H. C. (2001a) Estimating clear-sky beam irradiation from sunshine duration. *Solar Energy* 71, 4, 217–224.
- Power H. C. (2001b) Estimating atmospheric turbidity from climate data. *Atmos. Environ.* 35, 1, 125–134.
- Raichijk C., Grossi Gallegos H., Righini, R. (2008) Cartas preliminares de irradiación directa para Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 12, 11.01 -11.07 versión CD-ROM.
- Raichijk C., Fasulo A., Grossi Gallegos H. (2009) Estudio de validación de las correlaciones para la fracción difusa de la irradiación solar en San Luis. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 11.17 -11.24 versión CD-ROM.
- Stanhill G. (1998) Estimation of direct solar beam irradiance from measurements of the duration of bright sunshine. *Internat. J. of Climatology*, 18, 3, 347 – 354.
- Willmott, C.J. (1981) On the validation of models. *Physical Geography* 2, 184-194.

ABSTRACT: This work assesses the possibility of correlating the direct normal solar radiation with hours of bright sunshine in two stations located in different climatic regions: Ushuaia in Argentina and Botucatu, San Pablo, in Brazil. One counts for it with simultaneous monthly mean values of direct normal irradiance and insolation for different periods: 1995-2000 in Ushuaia and 1996-2005 in Botucatu. We studied two types of correlations: $\overline{H_{bn}} = \hat{f}(\bar{n})$ y $\overline{H_{bn}}/\overline{H_{on}} = \hat{f}(\bar{n}/\bar{N})$ and found in all cases a good level of fit for linear regression. When evaluating the different models were obtained mean square relative errors of 14.8%-13.8% in Ushuaia and 12.4%-13% in Botucatu, showing all correlations unbiased. It was determined, with good level of fit, common linear correlations for both stations, the mean square relative errors for these correlations are equals to 13.6%.

Key words: Correlations, direct normal solar radiation, hours of bright sunshine, Ushuaia, Botucatu.