



## ANÁLISIS DE LOS DATOS DE RADIACIÓN SOLAR DISPONIBLES EN USHUAIA, ARGENTINA

H. Grossi Gallegos<sup>1\*</sup>, A. Roberti<sup>2</sup>, V. Sierra<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>División Radiación Solar San Miguel, Servicio Meteorológico Nacional

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones San Miguel, Dirección de Investigación y Desarrollo FAA

Avda. R. Balbín (ex-Mitre) 3100, 1663 San Miguel, Buenos Aires, ARGENTINA

Telefax: (54-11) 4455 6762, E-mail: risol\_sanm@yahoo.com.ar

**RESUMEN:** Se presentan los promedios mensuales de la irradiación global diaria registrados en Ushuaia por la Red Solarimétrica y por la estación VAG. Se analiza el comportamiento de los promedios mensuales de irradiación difusa diaria y se establece una relación lineal entre la fracción difusa/global y el índice de claridad, lo que permite validar la relación propuesta por Suehrcke como una apropiada herramienta de estimación.

**Palabras clave:** irradiación solar, Ushuaia, correlaciones.

### INTRODUCCIÓN

La Red Solarimétrica de la ex-Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIE), en respuesta a una solicitud del Instituto Territorial de Vivienda y Urbanismo (INTEVU) instaló en 1986 en el Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC) del CONICET una estación de medición de la radiación solar global compuesta por un piranómetro termoeléctrico Eppley 8-48 "Black and White" y un integrador electrónico diario RELEVAR modelo EE 503, la que operó regularmente hasta abril de 1992 (latitud 54°48' S, longitud 67°45' W).

Por otra parte, el programa de Vigilancia Atmosférica Global-VAG (conocido en inglés por las siglas GAW-Global Atmosphere Watch) es una parte integral del Sistema Global de Observación del Clima establecido por acuerdo entre varias instituciones internacionales (WMO, UNESCO/IOC, UNEP e ICSU). El rol principal de la red VAG es proporcionar información básica, de calidad conocida, indicativa de la composición química y de las características físicas de la atmósfera en todas partes del mundo; para ello se ubicaron estaciones en lugares alejados y vírgenes, uno de los cuales es Ushuaia, provincia de la Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur (Argentina).

Entre los parámetros radiativos que allí se registran cada 3 minutos desde 1995 se cuenta la radiación solar global, la difusa (ambas con piranómetros Kipp & Zonen CM11) y la directa. Los datos que se disponían hasta el año 2000 fueron procesados y su calidad controlada por el Dr. Stephen Wilcox, del National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los EEUU de Norteamérica, y puestos a disposición del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), quien atiende la estación en las proximidades del aeropuerto.

Como esta información nunca fue publicada, consideramos que su análisis puede revestir importancia por tratarse de una localidad ubicada a elevada latitud que ha sufrido alguna variación en su medio ambiente en los últimos años. Por lo tanto, se estudió su comportamiento a través del tiempo y la validez de algunas correlaciones establecidas entre diferentes parámetros.

### MATERIALES Y MÉTODO

Se dispuso de los valores diarios de heliofanía del Banco de Datos del SMN, de los valores de irradiación solar global diaria procesados y archivados por la Red Solarimétrica (que nunca llegaron a publicarse por cesar la edición de su Boletín – ISSN 0326-6036 en el segundo semestre de 1985) y de los promedios mensuales de la estación VAG ya mencionados (Wilcox, 2004).

Los calidad de los datos de heliofanía fue controlada en el SMN, mientras que los datos de la Red Solarimétrica fueron tratados con un programa de consistencia que los relaciona con la heliofanía relativa y califica su confiabilidad (Roberti *et al.*, 2000), y los de la estación VAG lo fueron por el programa SERI QC de control de calidad desarrollado por NREL (Maxwell *et al.*, 1989, citado por Marion, 1993).

#### *Datos de radiación solar global*

En primer lugar, se analizaron las dos bases de datos por separado ya que la precisión del instrumental es diferente: el de la

\* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

\*\* Miembro de la Carrera del Personal de Apoyo del CONICET

estación de la Red Solarimétrica era de segunda clase y el de la estación VAG, de primera. Pero en vista de que la dispersión hallada no resultó importante, se decidió unificar las dos bases y tomar el mayor de los errores como incerteza de las mediciones. Así, en la figura 1 puede verse la variación de los promedios mensuales de la irradiación global diaria correspondiente a los diferentes años medidos por la Red Solarimétrica y por la estación VAG; y en la figura 2, el promedio general. Todos los valores son presentados en la tabla 1, expresando los promedios mensuales de los valores diarios en  $\text{kWh/m}^2$  e indicando la dispersión de los promedios para cada mes, en la misma unidad.

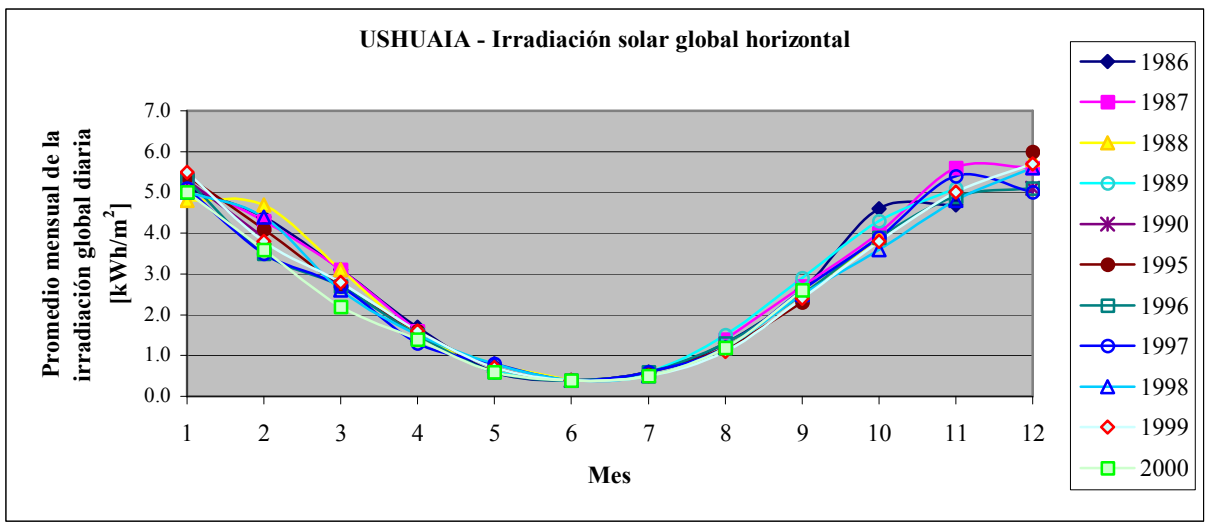


Figura 1. Variación temporal de los promedios mensuales de la irradiación global diaria correspondiente a cada uno de los diferentes años medidos por la Red Solarimétrica y por la estación VAG, expresados en  $\text{kWh/m}^2$ .

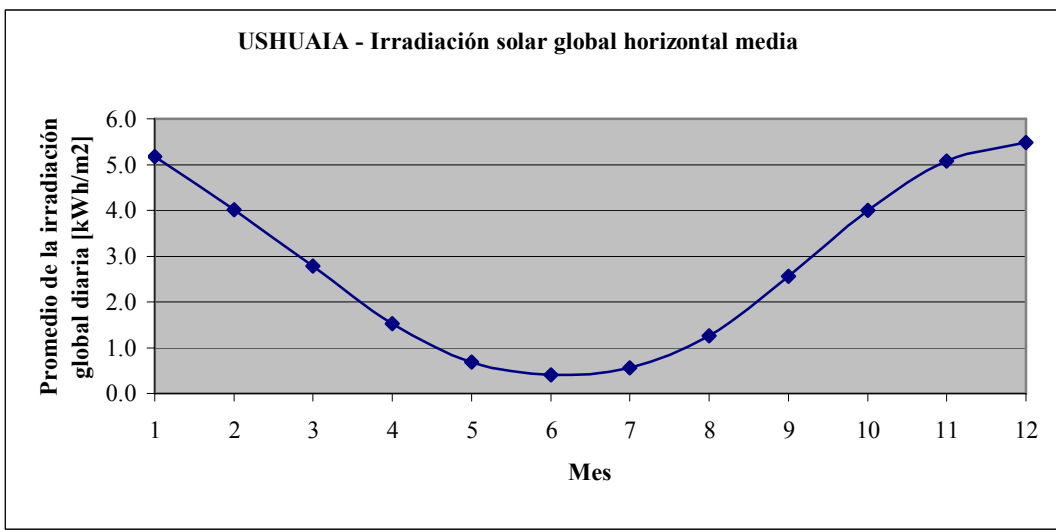


Figura 2. Variación temporal del promedio mensual de la irradiación global diaria correspondiente al total de los años medidos por la Red Solarimétrica y por la estación VAG, expresados en  $\text{kWh/m}^2$ .

Datos de irradiación solar difusa

En segundo lugar, se decidió analizar el comportamiento de los promedios mensuales de la irradiación difusa ya que no es muy común disponer de estos valores en nuestros países. Esos fueron registrados utilizando una banda sombreadora Eppley (ancho de la banda: 7.6 cm, radio de la banda: 31.7 cm) y corregidos por su efecto utilizando el algoritmo propuesto por Drummond (1956). Los valores obtenidos se presentan en la figura 3, también expresados en  $\text{kWh/m}^2$ .

Mes/Año	1986	1987	1988	1989	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	Media	Desvío
Ene	5.1	5.2	4.8		5.3	5.4	5.3	5.1	5.0	5.5	5.0	5.2	0.2
Feb	4.4	4.3	4.7		3.9	4.1	3.5	3.5	4.4	3.8	3.6	4.0	0.4
Mar	3.1	3.1	3.1			2.7	2.7	2.7	2.6	2.8	2.2	2.8	0.3
Abr	1.7	1.6	1.5			1.6	1.5	1.3	1.5	1.6	1.4	1.5	0.1
May	0.6		0.8	0.6		0.7	0.6	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	0.1
Jun	0.4	0.4	0.4	0.4		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0
Jul	0.6			0.6		0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.0
Ago	1.3	1.4	1.2	1.5		1.2	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.3	0.1
Sep	2.6	2.7	2.5	2.9		2.3	2.5	2.6	2.5	2.4	2.6	2.6	0.2
Oct	4.6	4.0	3.9	4.3			3.9	3.9	3.6	3.8		4.0	0.3
Nov	4.7	5.6		5.1			4.9	5.4	4.8	5.0		5.1	0.3
Dic		5.6	5.8		5.1	6.0	5.1	5.0	5.6	5.7		5.5	0.3

Tabla 1. Valores medios mensuales de la irradiación solar global diaria sobre plano horizontal registrada en Ushuaia y su desvío estándar, expresados en kWh/m<sup>2</sup>.

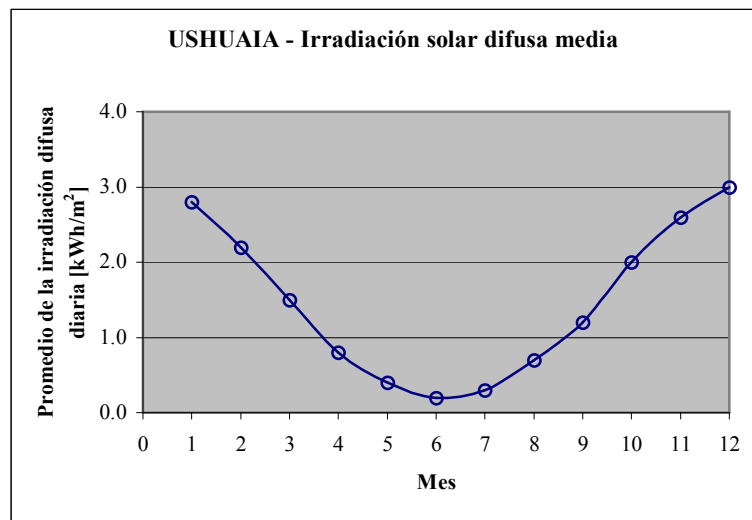


Figura 3. Variación temporal del promedio mensual de la irradiación difusa diaria correspondiente al total de los años medidos por la estación VAG, expresados en kWh/m<sup>2</sup>.

Existen en la bibliografía diferentes relaciones establecidas entre los promedios mensuales de la irradiación difusa y los de la global, como las propuestas por Page (1961), Iqbal (1979) y Collares-Pereira y Rabl (1979), siendo las dos primeras lineales y únicas para todo el año, mientras que la tercera es una correlación con coeficientes dependientes de la época del año a través del ángulo horario de puesta del sol.

Page consideró los promedios mensuales de irradiación solar global y difusa medidos durante períodos de diferente extensión (de 12 a 60 meses) en 10 estaciones ubicadas a diferentes alturas (de 5 a 1700 m s.n.m.) y bajo condiciones climáticas diversas entre las latitudes 40°N y 40°S, y estableció para cada una relación lineal entre los promedios de la fracción de irradiación difusa a global en función del promedio del índice de claridad, siendo una de las dificultades a solucionar en el trabajo el saber si se había aplicado correctamente la corrección por banda sombreadora. Los valores obtenidos para la pendiente iban de -0.95 a -1.43, mientras que los de la ordenada al origen variaban entre 0.72 y 1.20; promediando directamente estos valores obtuvo su conocida relación:

$$\overline{K_d} = \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1.00 - 1.13 \overline{K_t} \quad (1)$$

en donde  $K_t$  es el índice de claridad ( $H/H_0$ , simbolizando  $H_0$  la irradiación solar fuera de la atmósfera).

Iqbal propuso una relación levemente diferente utilizando datos de Canadá que estaban corregidos por el efecto de la banda sombreadora. Además, la correlación deducida utilizó para la constante solar el valor 1353 W/m<sup>2</sup>, mientras que Page usó uno más viejo. La expresión de Iqbal tiene la forma siguiente:

$$\overline{K_d} = \frac{\overline{H_d}}{H} = 0.958 - 0.982 \overline{K_t} \quad 0.3 < \overline{K_t} < 0.6 \quad (2)$$

Collares-Pereira y Rabl propusieron la siguiente correlación con coeficientes variables estacionalmente:

$$\overline{K_d} = \frac{\overline{H_d}}{H} = 0.773 - 0.347(\pi/180)(\overline{\omega} - 90^\circ) - \left[ 0.505 + 0.261(\pi/180)(\overline{\omega} - 90^\circ) \right] \cos \left[ 115^\circ \overline{K_t} - 103^\circ \right] \quad (3)$$

en donde  $\overline{\omega}$  es el ángulo horario medio de puesta del sol, el que toma el valor de  $90^\circ$  en los equinoccios, de  $100^\circ$  en el solsticio de verano y de  $80^\circ$  en el de invierno.

Sin embargo, cabe recordar que un trabajo de Ma e Iqbal (1984) determinó que la correlación de Page era la más simple y a la vez, precisa. Algo similar verificó Bashahu (2003) en Dakar.

En un trabajo anterior para Argentina (Grossi Gallegos *et al.*, 2003) se utilizó un modelo lineal para correlacionar los datos de difusa y global en la estación San Miguel, provincia de Buenos Aires, con un valor de constante solar de  $1367 \text{ W/m}^2$ , obteniéndose la expresión:

$$\overline{K_d} = \frac{\overline{H_d}}{H} = 1.11 - 1.36 \overline{K_t} \quad (4)$$

En esta ocasión, se calcularon los cocientes entre los promedios mensuales de la irradiación difusa y global diarios, por un lado, para todo el año y por otro, agrupándolos por estaciones: solsticios y equinoccios. Los resultados obtenidos en base anual se muestran en la figura 4.

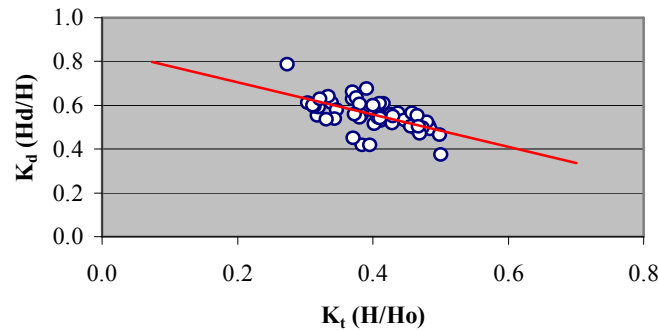


Figura 4. Correlación lineal establecida entre los promedios mensuales de la fracción de irradiación difusa a global y los promedios del índice de claridad para todo el año.

La expresión que corresponde a esta correlación de carácter anual es la siguiente:

$$\overline{K_d} = \frac{\overline{H_d}}{H} = 0.85 - 0.74 \overline{K_t} \quad (5)$$

mientras que la correspondiente al solsticio de verano toma la forma:

$$\overline{K_d} = \frac{\overline{H_d}}{H} = 1.11 - 1.27 \overline{K_t} \quad (6)$$

al solsticio de invierno es la que sigue:

$$\overline{K_d} = \frac{\overline{H_d}}{H} = 1.00 - 1.27 \overline{K_t} \quad (7)$$

y a los equinoccios:

$$\overline{K_d} = \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 0.86 - 0.76 \overline{K_t} \quad (8)$$

Si se grafican nuevamente todos los valores de la fracción, diferenciándolos por color de acuerdo a la época del año, se podría visualizar una cierta dependencia estacional, como se muestra en la figura 5, a la que se han superpuesto en la figura 6 las expresiones de Collares-Pereira y Rabl:

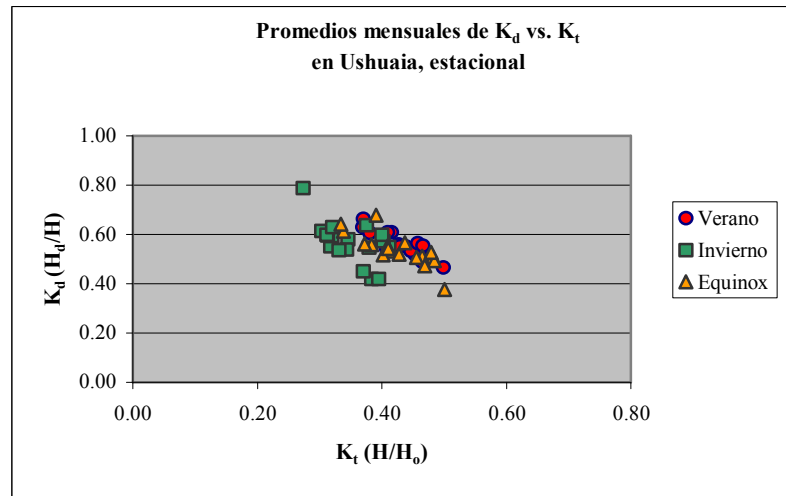


Figura 5. Distribución de los promedios mensuales de la fracción de irradiación difusa a global en función de los promedios del índice de claridad, agrupados por épocas del año.

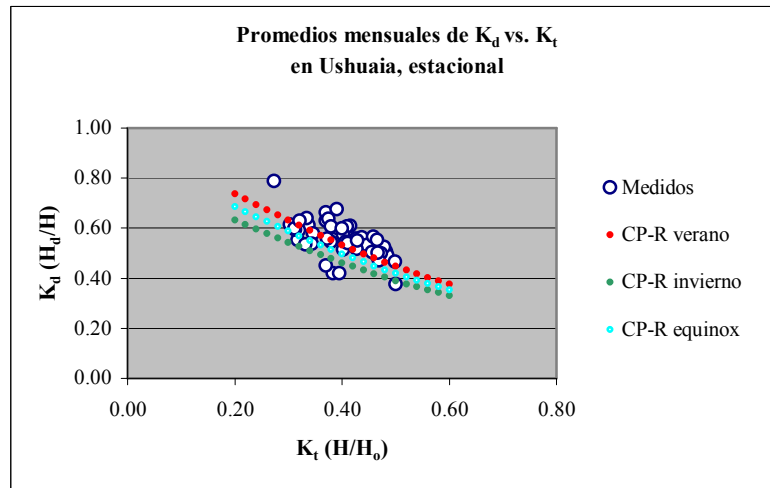


Figura 6. Distribución de los promedios mensuales de la fracción de irradiación difusa a global en función de los promedios del índice de claridad (superpuestas, las expresiones de Collares-Pereira y Rabl para cada época del año).

Todas las expresiones mostradas confirman una antigua conclusión de Klein y Duffie (1978) que señalaba que es necesario trabajar más antes de llegar a una correlación que revista carácter universal.

De todas maneras, se verificó que es posible expresar linealmente la correlación existente entre ambas magnitudes, lo que fortalece el método desarrollado por Suehrcke (2000) ya que se basa en este hecho, que ya fuera ensayado anteriormente en Argentina (Grossi Gallegos *et al.*, 2003) y al que puede considerarse como una alternativa válida para estimar los valores promedio de la irradiación solar global sobre un plano horizontal y así poder luego trazar nuevas cartas de su distribución temporal con quizás mejor resolución espacial, ya que se utilizaría como información de base la heliofanía, variable de la que se disponen datos de gran extensión en muchas más estaciones que las que miden radiación global.

Dando por válida entonces la correlación lineal a la que se hace referencia, Suehrcke dedujo la siguiente relación entre la heliofanía y el índice de claridad, recuperando el concepto de “día claro” introducido por Ångström:

$$\overline{K_t}^2 = \overline{K_c}^2 \frac{\overline{n}}{\overline{N}} \quad (9)$$

proponiendo como promedio para el  $K_c$  el valor 0.70. En esta expresión,  $n$  indica el número de horas de insolación medidas (heliofanía efectiva) y  $N$  la duración astronómica del día; su cociente se conoce como heliofanía relativa.

Dejando de lado la constante sugerida por el autor, se encaró la determinación de los valores apropiados para esta localidad, asumiendo la validez de la relación y buscando el valor de la constante que mejor ajustara la estimación de los valores medidos; esto es, calcular por cuadrados mínimos el valor de  $(K_c)^2$  que minimizara los errores de la distribución alrededor de la relación lineal (a diferencia del trabajo anterior en el que se buscaron los valores promedio del índice de claridad medidos en días claros en diferentes estaciones del país).

Se calcularon los valores medios mensuales de la heliofanía relativa y del índice de claridad diarios para Ushuaia, agrupándoselos por estación (esto es, verano, invierno y equinoccios) y en base anual, y se determinaron por cuadrados mínimos las pendientes (esto es, el cuadrado del índice de claridad correspondiente al día claro medio), llegándose a los valores que se presentan en la tabla 2.

Agrupamiento	$K_c$ medio
Verano	$0.78 \pm 0.13$
Invierno	$0.70 \pm 0.08$
Equinoccios	$0.75 \pm 0.08$
Anual	$0.75 \pm 0.04$

**Tabla 2.** Constantes de ajuste para la ecuación de Suehrcke con su error.

### 3. CONCLUSIONES

Del análisis de los valores promedio mensuales de irradiación solar difusa medidos en Ushuaia se concluye que es posible expresar linealmente la relación entre su fracción relativa a la global y el índice de claridad, lo que permite ratificar la validez de la relación establecida por Suehrcke para estimar los valores medios de global a partir de los correspondientes de heliofanía. La incerteza obtenida en la determinación del índice de claridad correspondiente a los días claros ( $K_c$ ) no permite su diferenciación estacional, por lo que se toma un único valor anual prácticamente coincidente por el recomendado por el autor.

### REFERENCIAS

- Bashahu M. (2003) Statistical comparison of models for estimating the monthly average daily diffuse radiation at a subtropical African site. *Solar Energy* **75**, 43-51.
- Collares-Pereira M. and Rabl A. (1979) The average distribution of solar radiation - Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* **22**, 155-164.
- Drummond, A. J. (1956). A contribution to absolute piheliometry. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **82**, 481-493.
- 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 (2003).
- Iqbal M. (1979). A study of Canadian diffuse and total solar radiación data. I. Monthly average daily horizontal radiación. *Solar Energy* **22**, 1, 81-86.
- Klein S. A. and Duffie, J. A. (1978) Estimation of monthly average diffuse radiation. *Proc. Ann. Meet. Am. Section ISES*, Denver, Colorado, USA.
- Ma C. C. Y. and Iqbal M. (1984) Statistical comparison of solar radiation correlations – Monthly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces. *Solar Energy* **33**, 2, 143-148.
- Marion W. (1993) Summary Information and Data Sets for NREL's Solar Radiation Research Laboratory, 1981-1991. NREL/TP-463-5217, UC Categories: 233,234, DE03000052, USA.
- Page J. (1961) The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. *Proc. UN Conf. On New Sources of Energy*, Paper No. 35/5/98, pp. 378-389.
- Roberti A., Renzini G. y Grossi Gallegos H. (2000). Desarrollo de un software capaz de correlacionar y consistir datos de irradiación solar y heliofanía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **4**, 2, 11.37-11.38.
- 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.
- Wilcox S. (2004) Comunicación personal.

**ABSTRACT:** We present monthly mean values of daily global irradiation measured in Ushuaia, given by the Solarimetric Network and GAW stations. We analyzed the behavior of monthly mean values of diffuse irradiation and established a linear relationship between diffuse/global ratio and clearness index; so it is possible to confirm the validity of Suehrcke's equation as an appropriate instrument for estimating mean global irradiation.

**Key words:** solar irradiation, Ushuaia, correlations.