

## CONTROL DE CALIDAD DE MEDICIONES DE RADIACIÓN SOLAR

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)

*Recibido: 30/07/12; Aceptado: 03/10/12*

**RESUMEN:** Se define un procedimiento de control de calidad para una base de datos horarios simultáneos de radiación solar global, difusa y directa. Los datos fueron obtenidos en la Estación Solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján en el período enero 2011 - junio 2012. Se analizan por separado los valores de radiación difusa y de directa, ambos en relación con la radiación global. Cuando, para valores simultáneos que superan el control de calidad propuesto (82,1% del total), se compara la radiación global medida con la radiación global derivada como la suma de sus componentes difusa y directa sobre plano horizontal se observan un coeficiente de determinación,  $R^2$ , igual a 0,995 y una pendiente de 0,975 para un ajuste lineal entre ambas magnitudes. Estos resultados indican que el método analizado identifica eficazmente mediciones que puedan ser erróneas o atípicas garantizando una buena consistencia entre valores obtenidos de radiación global, difusa y directa.

**Palabras clave:** control de calidad, radiación solar global, difusa y directa.

### INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenido de nuevas tecnologías de aprovechamiento de la radiación solar incidente exige un relevamiento confiable y preciso del recurso disponible en cada lugar. Los datos de radiación solar que puedan ser obtenidos en una estación solarimétrica conllevan, como cualquier medición, errores. Younes et al. (2005) señala dos grandes grupos de causas posibles de errores en la medición de la radiación solar: errores relacionados con la construcción e incertezas propias de los sensores utilizados y errores operacionales. En el primer grupo la causa más reconocida es la llamada respuesta coseno del instrumento para ángulos grandes de incidencia y por lo tanto muy presente en horas del amanecer y atardecer. Otras causas posibles identificables con el sensor son: imperfecciones en el domo vidriado, variación en la respuesta debido a fluctuaciones de temperatura, respuesta espectral selectiva de la absorbancia de la pintura negra y de la transmitancia del vidrio. Sumado al deterioro natural del instrumento que puede implicar cambios de  $\pm 1\%$  por año en las mediciones obtenidas, lo que exige una recalibración periódica del mismo. Dentro de los problemas operativos se pueden señalar: polvo, nieve, rocío o algún tipo de sombra sobre el sensor, desacople de la banda sombreadora, corte de suministro eléctrico, etc.

Por control de calidad de cualquier tipo de medición se entiende el conjunto de procedimientos estipulados tendientes a detectar errores y, eventualmente, completar datos perdidos o corregir valores anómalos. Para mediciones de radiación solar el control de calidad consiste en general en la definición de una serie de filtros que imponen límites inferiores y superiores de aceptación a las distintas magnitudes obtenidas. Estos límites se definen tanto en base a consideraciones físicas para identificar valores imposibles de ser observados como a criterios estadísticos que posibilitan detectar datos anómalos o cuestionables.

Younes et al. (2005) para una base de datos simultáneos de radiación solar global,  $h$ , y difusa,  $d$ , establecen 4 filtros: 3 físicos y uno estadístico. El primer filtro relacionado con la respuesta coseno del sensor propone descartar datos cuya altura solar,  $\alpha$ , sea menor a  $7^\circ$ . La Comisión Internacional de Iluminación (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) en cambio establece el límite en  $4^\circ$  (Kendrick et al., 1994; citado en Younes et al., 2005), Journée y Bertrand (2011) reducen la exigencia a ángulos menores a  $2^\circ$ . El segundo filtro exige que tanto el índice de claridad,  $k_t$ , como la fracción difusa,  $k_d$ , varíen entre cero y uno. La CIE teniendo en cuenta la incerteza de ambos sensores intervinientes propone para la fracción difusa un límite superior de 1,1. El tercer filtro impone un límite superior a la radiación global y límites inferiores y superiores a la difusa. La radiación global en superficie no debe superar la radiación global de cielo claro,  $h_c$ , estimada para el lugar y época del año, mientras que la radiación difusa puede variar entre un valor mínimo asociado a una condición de cielo claro,  $d_c$ , y un máximo estimado para un cielo completamente cubierto (overcast sky),  $d_{ov}$ . La radiación global y difusa de cielo claro se estiman mediante el modelo de cielo claro europeo ESRA (Rigollier et al, 2000) parametrizado respecto del índice de turbidez de Linke para una aeromasa igual a 2, TL(M2). Ruiz-Arias et al. (2010) consideran un valor de TL(M2) igual a 2,5 para caracterizar una condición de cielo claro, Journée y Bertrand (2011) imponen un valor extremo igual a 1. Para la radiación difusa máxima de cielo completamente cubierto se toma una expresión propuesta por Page (1997). El cuarto filtro es de carácter estadístico. En el espacio adimensional  $k_d - k_t$  se calcula para cada intervalo de  $k_t$  de ancho 0,1 el valor medio de la fracción difusa,  $\bar{k}_d$ , y su desvío estándar,  $\sigma_k$ , definiendo dos envolventes: una superior que une los puntos  $\bar{k}_d + 2\sigma_k$  y otra inferior con los valores  $\bar{k}_d - 2\sigma_k$ .

Maxwell et al. (1993) desarrollaron un método de control de calidad para una base de datos simultáneos de radiación normal directa,  $b_n$ , y global. Considerando valores con alturas solares mayores a  $10^\circ$  se definen empíricamente en el espacio adimensional  $k_n - k_t$ , siendo  $k_n$  la transmitancia para la radiación normal directa, valores máximos de  $k_n$  y  $k_t$  y dos curvas envolventes a derecha e izquierda de tal manera de incluir la mayor cantidad de información posible. Las curvas que determinan los límites a derecha e izquierda son funciones  $k_n=f(k_t)$  parametrizadas de doble exponencial de Gompertz que representan, en una primera aproximación, el comportamiento teórico de estas variables según el modelo de cielo claro de Bird (Bird y Hulstrom, 1981) para distintas condiciones climáticas. Estas funciones y los valores máximos esperados de  $k_n$  y  $k_t$  se ajustan para cada nube de puntos, correspondientes a cada mes del año y agrupadas en función de la aeromasa,  $m$ , en tres grupos: para  $1 < m \leq 1,25$  o ángulos cenitales “bajos”, para  $1,25 < m \leq 2,5$  o ángulos cenitales “medios”, y para  $2,5 < m < 5,76$  o ángulos cenitales “altos”, de acuerdo a la terminología empleada por los autores.

Journée y Bertrand (2011) a los filtros físicos y estadísticos agregan filtros de paso (step tests) y de persistencia a fin de detectar saltos bruscos entre dos mediciones consecutivas o valores perdidos debidos a bloqueos transitorios del sensor.

En el presente trabajo se analizan por separado datos horarios de radiación difusa y de directa, ambos en relación con la radiación horaria global. En primera instancia, mediante filtros físicos, se selecciona un conjunto de valores para los cuales se definen las fracciones medias difusa,  $\bar{k}_d$ , y directa,  $\bar{k}_b$ , y sus respectivos desvíos estándares,  $\sigma_k$ , para cada intervalo de  $k_t$  y se establecen correlaciones entre las distintas fracciones y  $k_t$  que puedan ser utilizadas cuando se necesite completar o corregir la base de datos disponible. Finalmente, para el total de valores horarios obtenidos tanto de radiación difusa como de directa, siguiendo la propuesta de Younes et al. (2005), se identifica como erróneo o anómalo aquel valor cuya fracción supere los límites del intervalo  $[\bar{k}_{d|b} - 2\sigma_k, \bar{k}_{d|b} + 2\sigma_k]$  definido previamente para su correspondiente  $k_t$ .

## MATERIALES Y MÉTODOS

La base de datos analizada ha sido obtenida en la Estación Solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján ( $34^\circ 35'S$ ,  $59^\circ 03'W$ , 20 msnm) durante el periodo enero 2011 – junio de 2012. Se utilizó un piranómetro Kipp & Zonen CMP11 para medir la radiación global y un seguidor solar Kipp&Zonen SOLYS 2 controlado por GPS y dotado con una esfera sombreadora donde se monta un pirheliómetro Eppley NIP y un piranómetro Eppley 8-48 “Black and White” destinados a medir la radiación solar normal directa y difusa respectivamente. Las mediciones en los tres casos se efectuaron cada 1 minuto.

En primer lugar se consideran valores integrados horarios de radiación global, difusa y normal directa completos, con todos sus datos minutarios intermedios definidos. Para valores horarios simultáneos completos de radiación difusa,  $d$  ( $MJ/m^2$ ), y global sobre plano horizontal,  $h$  ( $MJ/m^2$ ), se seleccionan aquellos valores que satisfagan los siguientes filtros físicos:

$$\alpha > 10^\circ \quad (1a)$$

$$0 \leq h \leq h_c \quad (1b)$$

$$d_c \leq d \leq d_{ov} \quad (1c)$$

$$0 \leq k_d \leq 1,1 \quad (1d)$$

$$k_d \geq 0,9 \text{ para } k_t < 0,2 \quad (1e)$$

$$k_d \leq 0,8 \text{ para } k_t > 0,6 \quad (1f)$$

siendo  $\alpha$  la altura solar medida en grados;  $h_c$ ,  $d_c$  y  $d_{ov}$ , todas en  $MJ/m^2$ , las radiaciones horarias estimadas global y difusa de cielo claro y difusa de cielo completamente cubierto respectivamente;  $k_d$  la fracción difusa definida como el cociente  $k_d = d / h$  y  $k_t$  el índice de claridad,  $k_t = h / h_o$ , donde  $h_o$  ( $MJ/m^2$ ) es la radiación horaria en plano horizontal a tope de atmósfera.

En (1a) se toma  $10^\circ$  ya que el mismo límite se establece en el método propuesto por Maxwell et al. (1993) para valores simultáneos de radiación normal directa y global que se empleará a continuación. En (1b) y (1c) las radiaciones horarias para cielo claro global,  $h_c$ , y difusa,  $d_c$ , se estiman mediante el modelo de cielo claro europeo ESRA (Rigollier et al., 2000) donde el índice de turbidez de Linke para una aeromasa igual a 2,  $TL(M2)$ , se fija en un valor de 2. Para la radiación horaria difusa máxima de cielo completamente cubierto,  $d_{ov}$ , se emplea la expresión propuesta por Page (1997) citada en Younes et al. (2005) y en Ruiz-Arias et al. (2010):

$$d_{ov} (W/m^2) = 572 \alpha \quad (2)$$

donde  $\alpha$  se expresa en radianes.

En el filtro (1d) se sigue la recomendación de la CIE citada en Younes et al. (2005) para el límite superior de  $k_d$  fijado en 1,1 donde se tiene en cuenta la incerteza de los sensores utilizados.

Los filtros (1e) y (1f) para la fracción difusa,  $k_d$ , fueron establecidos por Reindl et al. (1990) para condiciones de cielo cubierto,  $k_t < 0,2$ , y de cielo claro,  $k_t > 0,6$ , respectivamente.

Para valores horarios simultáneos completos de radiación normal directa,  $b_n$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ), y global se emplea como filtro físico el método propuesto por Maxwell et al. (1993). En nuestro caso se toman todos los valores horarios disponibles completos con alturas solares,  $\alpha$ , mayores a  $10^\circ$  divididos en tres grupos definidos en función de la aeromasa,  $m$ : para  $1 < m \leq 1,25$ ,  $1,25 < m \leq 2,5$  y  $2,5 < m \leq 5,76$ . En el espacio adimensional  $k_n - k_t$  se establecen empíricamente valores máximos de  $k_n$  y  $k_t$  y dos curvas envolventes a derecha e izquierda tratando de incluir la mayor cantidad de datos posible. La transmitancia para la radiación normal directa,  $k_n$ , se define como el cociente  $k_n = b_n / h_{on}$  donde  $h_{on}$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) es la radiación horaria normal a tope de atmósfera. Las curvas envolventes a derecha e izquierda son funciones de doble exponencial de Gompertz tipo:

$$k_n = A B^C B^{D k_t} \quad (3)$$

siendo A, B, C y D coeficientes a definir.

En la Figura 1 a modo de ejemplo se muestra en el plano  $k_n - k_t$  la nube de puntos correspondiente a valores horarios de radiación normal directa completos para ángulos cenitales medios ( $1,25 < m \leq 2,5$ ) con las curvas envolventes, consignándose el número de casos analizado y el porcentaje de valores descartados.

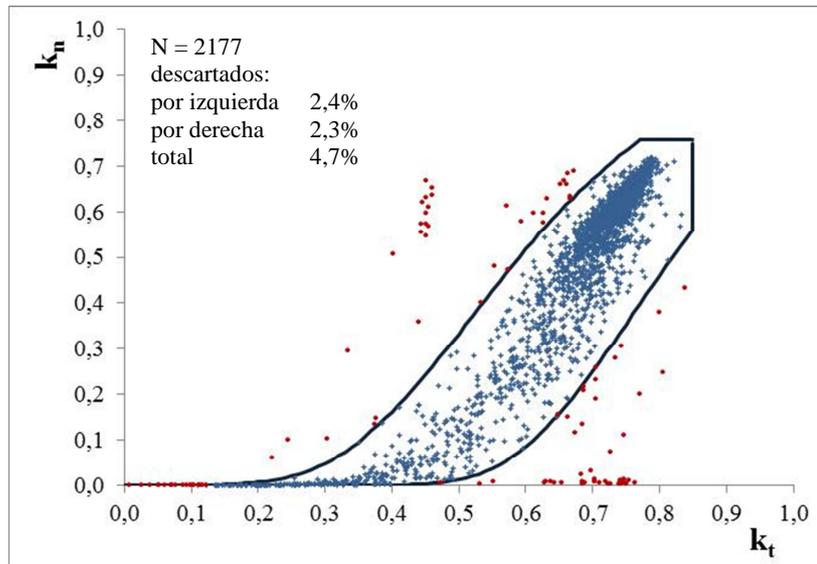


Figura 1: Curvas envolventes en el plano  $k_n - k_t$  definidas para valores horarios completos de radiación normal directa para ángulos cenitales medios ( $1,25 < m \leq 2,5$ ).

Luego para los valores horarios completos de radiación difusa,  $d$ , y directa proyectada sobre plano horizontal,  $b$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ), que superan los filtros físicos antes mencionados se definen las fracciones medias difusa y directa,  $\bar{k}_d$  y  $\bar{k}_b$  ( $k_b = b / h$ ), y sus respectivos desvíos estándares,  $\sigma_k$ , para cada intervalo de  $k_t$  de ancho 0,05 y correlaciones para las fracciones difusa y directa en función de  $k_t$ . Estas correlaciones podrán ser utilizadas cuando sea necesario completar datos perdidos o reemplazar valores erróneos. Las correlaciones de descomposición, como proponen Ruiz-Arias et al. (2010), se buscan ajustar por medio de funciones sigmoideas del tipo: para la fracción difusa,  $k_d = a - c \exp\{- \exp(e + f k_t)\}$ , y para la fracción directa,  $k_b = 1 - [g - h \exp\{- \exp(i + j k_t)\}]$ , donde a, c, e, f, g, h, i y j son coeficientes a determinar.

Por último se considera el total de valores horarios de radiación difusa y directa sobre plano horizontal integrados con un mínimo de 90% de datos minutarios intermedios definidos tomando como erróneos o cuestionables aquellos valores cuyas fracciones no se encuentren en el intervalo  $[\bar{k}_{d|b} - 2\sigma_k, \bar{k}_{d|b} + 2\sigma_k]$  definido previamente para su respectivo  $k_t$ .

Para evaluar el método empleado se utilizaron los siguientes estimadores estadísticos: error cuadrático medio relativo, RMSE%, y desvío medio relativo, MBE%:

$$\text{RMSE\%} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (X_{\text{obs}} - X_{\text{est}})^2 / n \right]^{0,5}}{\sum_{i=1}^n X_{\text{obs}} / n} 100\% \quad (4)$$

$$\text{MBE\%} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{obs}} - X_{\text{est}})}{\sum_{i=1}^n X_{\text{obs}}} 100\% \quad (5)$$

siendo  $X_{\text{obs}}$  y  $X_{\text{est}}$  los valores observados y estimados respectivamente. También se consideró el coeficiente de determinación  $R^2$  de la regresión asociada.

## RESULTADOS

En la Figura 2 se muestran en los gráficos  $k_{\text{db}} - k_t$  los conjuntos de valores horarios completos de radiación difusa (Fig. 2a) y directa sobre plano horizontal (Fig. 2b) que superan los filtros físicos propuestos junto a las curvas de ajuste halladas con sus respectivos coeficientes de determinación,  $R^2$ .

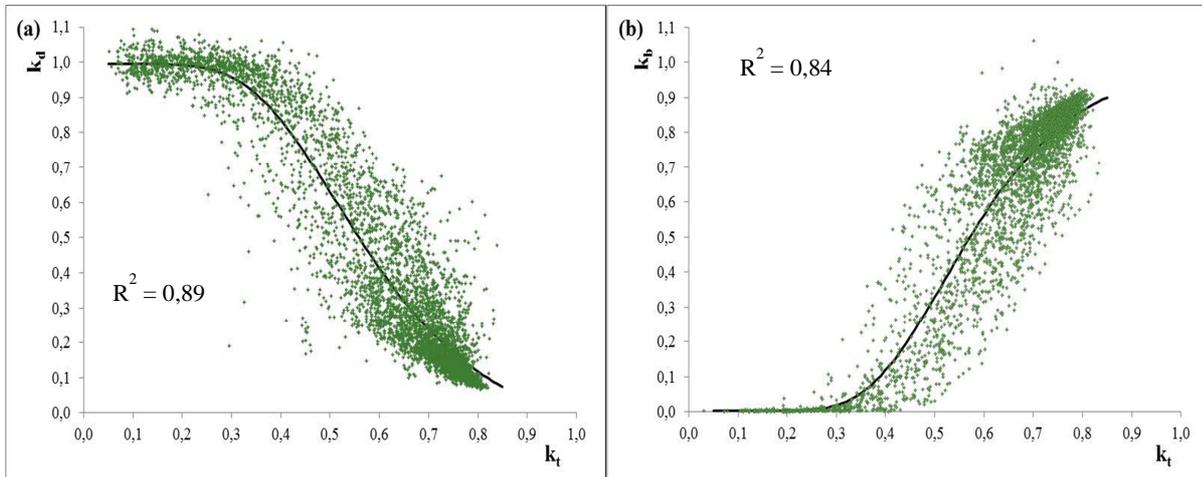


Figura 2: Valores horarios completos de radiación difusa (a) y directa sobre plano horizontal (b) que superan los filtros físicos propuestos y curvas de ajuste halladas.

Las curvas de ajuste halladas tienen las siguientes expresiones analíticas:

$$k_d = 0,995 - 1,063 \exp\{- \exp (2,932 - 5,731 k_t)\} \quad (6)$$

$$k_b = 1 - [0,997 - 1,006 \exp\{- \exp (3,385 - 6,534 k_t)\}] \quad (7)$$

La Figura 3 muestra el total de valores horarios integrados con un mínimo de 90% de datos minutaros intermedios definidos de radiación difusa (3a) y directa sobre plano horizontal (3b) consignándose en rojo los valores que no superan el filtro estadístico propuesto.

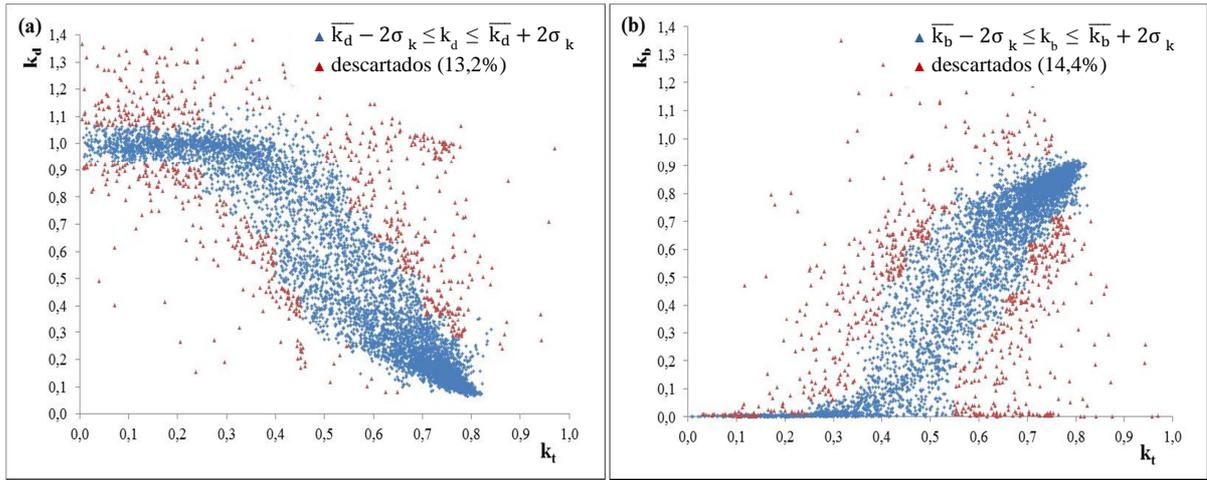


Figura 3: Total de valores horarios integrados con un mínimo de 90% de datos minutarios intermedios definidos de radiación difusa (a) y directa sobre plano horizontal (b).

Con el objeto de validar el método propuesto se comparó, para el conjunto de datos horarios simultáneos que superan los controles de calidad, la radiación global medida con la radiación global derivada como la suma de sus componentes difusa y directa sobre plano horizontal,  $h_{der} = d + b$ . En la Figura 4 se muestra  $h_{med}$  vs.  $h_{der}$  indicándose a su vez el coeficiente de determinación,  $R^2$ , y la pendiente hallada para un ajuste lineal entre ambas variables.

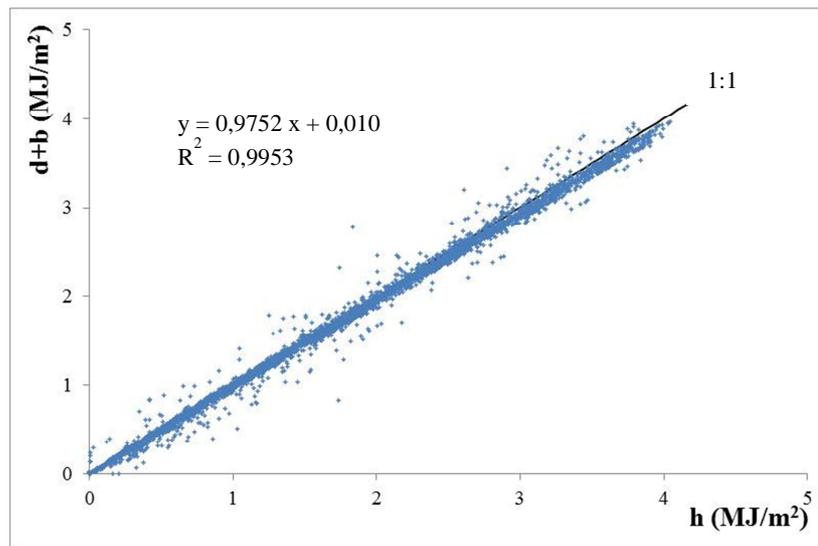


Figura 4: Valores horarios de radiación global medidos vs. derivados como la suma de sus componentes.

## CONCLUSIONES

Se definió un método de control de calidad para bases de datos horarios simultáneos de radiación difusa y global y de radiación normal directa y global. En ambos casos el procedimiento propuesto consiste en un test estadístico que busca identificar valores erróneos o anómalos. Para ello previamente se definen para datos horarios completos que superen una serie de filtros físicos valores medios de las fracciones difusa y directa y sus respectivos desvíos estándares para cada intervalo de  $k_t$  de ancho 0,05. A su vez se establecieron empíricamente para el conjunto de datos antes mencionado correlaciones para las fracciones difusa y directa en función de  $k_t$ . Las curvas de ajuste para las correlaciones de descomposición se definieron con un  $R^2 = 0,89$  y con un  $\text{RMSE}\% = 24,3\%$  y un  $\text{MBE}\% = 2 \cdot 10^{-4}$  al comparar valores estimados y medidos para  $k_d$  mientras que para  $k_b$  se obtuvieron los siguientes valores para los estimadores estadísticos:  $R^2 = 0,84$ ,  $\text{RMSE}\% = 17,4\%$  y  $\text{MBE}\% = -2 \cdot 10^{-4}$ . Estas correlaciones permitirán completar o corregir si fuera necesario la base de datos obtenida.

Con los valores horarios integrados con un mínimo de 90% de datos minutarios intermedios definidos que superan los controles de calidad propuestos (82,1% del total,  $0 \leq \alpha \leq 78$ ,  $0 \leq k_t \leq 0,82$ ) se compararon valores medidos de radiación global con valores derivados como la suma de las componentes difusa y directa sobre plano horizontal. Se obtuvieron un  $R^2 = 0,9953$  y una pendiente igual a 0,9752 para un ajuste lineal entre ambas magnitudes con un  $RMSE\% = 4,8\%$  y un  $MBE\% = 1,9\%$  al comparar valores derivados y medidos. Estos resultados permiten asegurar que los controles de calidad analizados identifican adecuadamente valores que puedan ser erróneos o anómalos garantizando una buena consistencia entre mediciones simultáneas de radiación global, difusa y directa.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea destacar el trabajo continuo y cuidadoso de A. Roldán en la compilación de los datos, mantenimiento del instrumental y realización de calibraciones periódicas de los sensores de la Estación Solarimétrica.

## REFERENCIAS

- Bird R. y Hulstrom R. (1981) A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. SERI/TR, 642–761. Golden, CO: Solar Energy Research Institute.
- Journée M. y Bertrand C. (2011) Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. Solar Energy 85, 72–86.
- Kendrick D., et al. (1994) Guide to recommended practice of daylight measurement. Report no. CIE-108. Wein, Austria: International Commission on Illumination (CIE).
- Maxwell G., Wilcox S., Rymes M. (1993) Users Manual for SERI QC Software. Assessing the Quality of Solar Radiation Data. Publicado por NREL- National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA.
- Page J. (1997) Proposed quality control procedures for the Meteorological Office data tapes relating to global solar radiation, diffuse solar radiation, sunshine and cloud in the UK. Report submitted to CIBSE Guide Solar Data Task Group, Chartered Institute of Building Services Engineers, 222 Balham High Road, London, UK.
- Reindl D.T., Beckman W.A., Duffie J.A. (1990) Diffuse fraction corrections. Solar Energy 45, 1–7.
- 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, 33–48.
- Ruiz-Arias J.A., Alsamamra H., Tovar-Pescador J., Pozo-Vázquez D. (2010) Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. Energy Conversion and Management 51, 881–893.
- Younes S., Claywell R., Muneer T. (2005) Quality control of solar radiation data: present status and proposed new approaches. Energy 30, 1533–1549.

## QUALITY CONTROL OF SOLAR RADIATION MEASUREMENTS

**ABSTRACT:** In the present work a quality control procedure for a solar radiation data base is defined. Hourly global, direct and diffuse radiation data were recorded from January 2011 to June 2012 at the Solarimetric Station of the Universidad de Lujan, Buenos Aires, Argentina. Direct and diffuse radiation data are analysed independently and both in relation to global radiation measurements. When, for simultaneous values that passed the proposed quality control criteria (82, 1 % of the total), the sum of direct and diffuse values is contrasted with the corresponding measured global radiation value, a correlation coefficient,  $R^2$ , equal to 0,995 and a slope of 0,975 are deduced for a lineal fitting between both sets of values. These results indicate that proposed quality control criteria are appropriated for identifying measurement values that may be erroneous or atypical, assuring consistence between measured values of global, direct and diffuse solar radiation.

**Key words:** quality control, solar global, diffuse and direct radiation.