

Un modelo de análisis de la radiación solar para uso energético

Jorge Adaro ^a, María Ziletti ^b, Fabián Romero ^c, Santiago Esquenazi ^d

^a Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, aadaro@ing.unrc.edu.ar.

^b Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, mziletti@ing.unrc.edu.ar.

^c Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, fromero@ing.unrc.edu.ar.

^d Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, sequenazi@ing.unrc.edu.ar.

RESUMEN: El conocimiento de la radiación solar en la superficie de la tierra se requiere para muchos usos. Los valores medios mensuales medidos de la irradiación diaria son generalmente la mejor fuente de la información y proporcionan el punto de partida para muchos cálculos. La utilidad de promedios mensuales de radiación diaria se puede entender del hecho que en una localización particular estos promedios son relativamente constantes y brindan buena información para las aplicaciones en general. En el presente trabajo se analiza la radiación solar medida en la ciudad de San Luis durante cinco años. Se obtienen los valores del índice de claridad y la fracción de días claros, verificando la relación de Suerhrcke, comparando los valores medidos con los obtenidos además por los modelos de Ångström-Prescott, de Reitvel, y de Glover y McCulloch, y analizando los errores MBE y RMSE. Se analiza la fracción difusa de la radiación solar global, encontrando la correlación entre K_d y K_t propuesta por Page, y también se encuentran los porcentajes de días muy nublados, parcialmente nublados y de cielo claro.

PALABRAS CLAVE: radiación solar, índice de claridad, fracción de días claros.

1 INTRODUCCIÓN

Cuando no existen mediciones, es posible estimar la radiación a partir de las horas de sol, dado que la cantidad de irradiación solar está relacionada con la cantidad de tiempo de cielo despejado (medida a través de las Horas de Sol o Heliofanía, cantidad de tiempo en el día en que la irradiación directa en incidencia normal supera el umbral de 120 W/m^2). Estas relaciones han sido tratadas desde el inicio del siglo XX por diferentes propuestas como han sido las conocidas ecuaciones de Ångström-Prescott (Black et al., 1954), y las derivadas de esta, como la de Reitvel (1978) y la de Glover y McCulloch (1958), y, más recientemente, la de Suehrcke (2000).

En general, la relación entre las horas de sol y la radiación se ha utilizado para estimar esta última, pero una nueva visión permitiría dar la opción de poder encontrar la fracción de tiempo de cielo claro a partir de las mediciones de radiación.

La aproximación establecida por Suehrcke entre el promedio mensual de la radiación solar diaria y el brillo solar (o fracción de días claros) es tomada en esta oportunidad de tal manera que la fracción de cielo claro n/N se define como f_{clear} a través de la siguiente expresión:

$$f_{\text{clear}} = \frac{\overline{H}_b}{\overline{H}_{b, \text{clear}}} \quad (1)$$

donde \overline{H}_b es el promedio mensual de la radiación directa diaria horizontal y $\overline{H}_{b, \text{clear}}$ es el promedio mensual de la radiación directa horizontal de días claros. Se entiende por días claros aquellos en los cuales el cielo se encuentra libre de nubes durante todo el día.

Para relacionar \overline{H}_b con la media mensual de la radiación diaria sobre superficie horizontal H, Suehrcke usa la expresión de fracción difusa (Page, 1961) y demuestra que:

$$f_{clear} = \left(\frac{\overline{K}}{\overline{K}_{clear}} \right)^2 \quad (2)$$

donde $\overline{K} = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0}$ es la media mensual del índice de claridad diario, y $\overline{K}_{clear} = \frac{\overline{H}_{clear}}{\overline{H}_0}$ es la media mensual del índice de claridad para días de cielo limpio.

2 MATERIALES Y METODOS

Se tomaron como datos de partida las medidas de radiación solar horizontal y la radiación solar normal directa tomadas en intervalos de una hora en la ciudad de San Luis-Argentina (33.27° S, 66.35° W, 730 msnm), a partir de los cuales se obtuvieron los valores de radiación difusa y la radiación directa sobre el plano horizontal. Los instrumentos utilizados para medir estas radiaciones fueron un piranómetro Eppley Precision Spectral Pyranometer (PSP) y un pirheliómetro Eppley normal-incidence pyrhelimeter (NIP). Los valores de H_0 fueron calculados usando las expresiones de la radiación extraterrestre diaria de Iqbal (1983). El valor de la constante solar utilizado fue 1367 W / m². Luego se calcularon los promedios mensuales \overline{H} , \overline{H}_b , $\overline{H}_{b,clear}$, \overline{K} , \overline{K}_{clear} . Los valores medios mensuales de f_{clear} se encontraron a partir de la ecuación (2) utilizando los valores de \overline{H}_b y $\overline{H}_{b,clear}$.

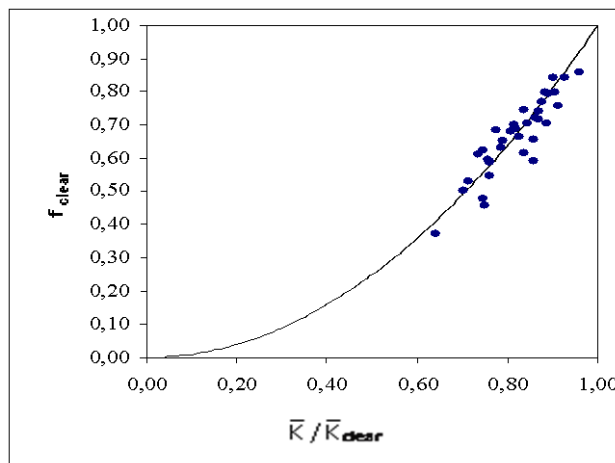


Figura 1. Ecuación de Suehrcke y datos experimentales para San Luis

Con los datos de origen y el período considerado, se encuentran los valores de H_0 , K_d y K_t diarios y los valores \overline{H}_0 , \overline{K}_d y \overline{K}_t mensuales. Se obtienen para $K_t > 0,7$ los valores de \overline{K}_{clear} , \overline{H}_{clear} y $\overline{H}_{b,clear}$, repitiendo los últimos cálculos para $K_t > 0,65$ y $K_t > 0,68$.

Para el conjunto de datos analizados, que se corresponde a los cinco años de información de la ciudad de San Luis, se observó con $K_t > 0,68$ una mejor aproximación, dado que arrojaba el menor error, y se adoptó este último para los cálculos siguientes.

La relación (2) entre f_{clear} y $\frac{\bar{K}}{\bar{K}_{clear}}$ se puede ver en la figura 1, en la que se agregan los valores experimentales para la ciudad de San Luis, mostrando que dicha relación es un buen ajuste en los datos considerados en esta ocasión. En el análisis de la relación (2) en términos de $\bar{K} = \bar{K}_{clear}(f_{clear})^{1/2}$, se pudo observar que el ajuste se da para valores de K_{clear} entre 0,63 y 0,73, siendo el valor de $K_{clear} = 0,68$ el mejor para las mediciones de los cinco años para San Luis. Este valor es más ajustado que el dado por Torre Deluisi y Fasulo (2002), que publicaban un valor de $K_{clear} = 0,7$.

La ecuación de Suehrcke (2) es interesante, dado que a partir de K_{clear} se puede obtener el valor de \bar{H} con la expresión:

$$\bar{H} = \bar{H}_0 \bar{K}_{clear} (f_{clear})^{1/2} \quad (3)$$

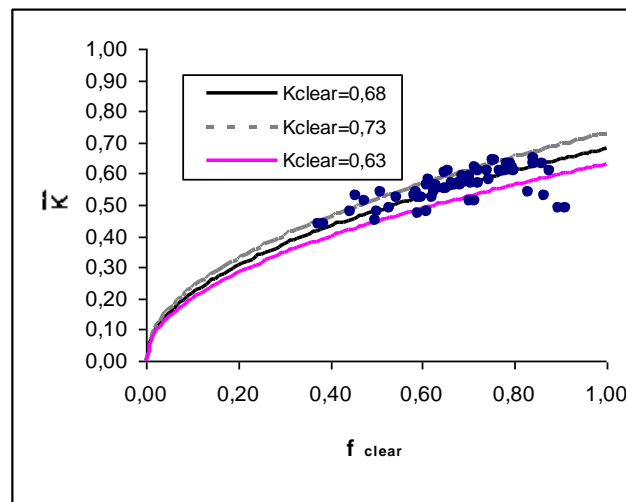


Figura 2. Datos experimentales de San Luis y la relación de entre f_{clear} y \bar{K} .

A partir de la expresión (3) se obtienen los valores de \bar{H} , de igual modo se obtienen los valores al aplicar los modelos Ångström-Prescott, Reitvel, y la de Glover y McCulloch, y se los compara con los valores medios. En el modelo de Ångström-Prescott se utilizan como constantes $A = 2,28$ y $B = 0,42$, valores encontrados por Torre Deluisi y Fasulo (2002).

Se muestran los resultados en la Tabla 1, en la que se incluyen los errores RMSE y MBE y, en la Figura 3, se muestra la comparación entre el promedio mensual de la radiación global diaria medida y la de los modelos para el año 2002.

En la figura 3 se observa que, para el mes de noviembre, todos los modelos sobreestiman los valores de \bar{H} , encontrando su explicación en el hecho que, para ese mes, el valor de $\frac{\bar{K}}{\bar{K}_{clear}}$ es equivalente a 0,93, siendo este muy elevado ya que muestra un alto valor del índice de claridad para los días de cielo claro, los que seguramente no conciben con la cantidad de días con esa característica en el correspondiente mes.

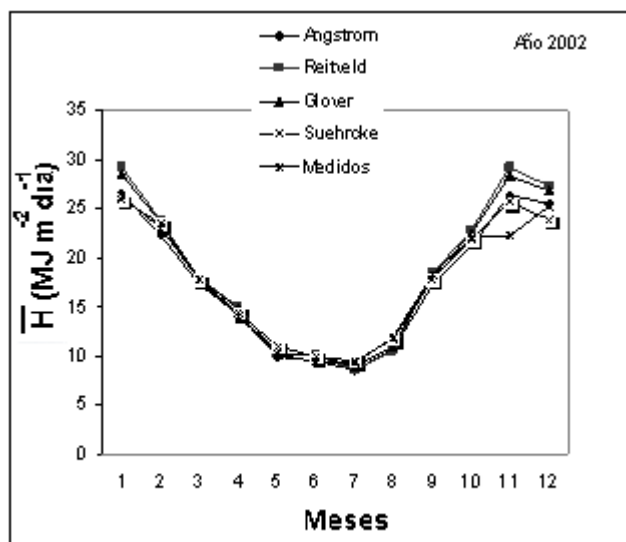


Figura 3 Comparación entre los valores medidos de la radiación global diaria y los obtenidos por los diferentes modelos.

Desde la simple comparación visual de los valores que predicen los modelos, no se puede juzgar la mejor aproximación de un modelo sobre otro. El tratamiento estadístico de las diferencias relativas porcentuales entre los valores estimados y los medidos, los modelos de Ångström- Prescott y el propuesto por Suehrcke son los que presentan menores valores de MSE y de RMSE, con una ligera ventaja para el de Suehrcke. El RMSE es un valor bajo para todos los modelos y es un poco mayor al 1% para los modelos que mejor aproximan.

Tabla 1 Valores de MBE y RMSE para los diferentes modelos

| Mes | Dif. Rel. % Ångström | Dif. Rel. % Reitvel | Dif. Rel. % Glover | Dif. Rel. % Suehrcke |
|------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| MBE | -0,03 | 1,09 | 0,92 | 0,24 |
| RMSE | 1,36 | 2,36 | 1,99 | 1,13 |

Los modelos, en general, son una buena aproximación y, particularmente, el más reciente de Suehrcke, ya que una aplicación de este último resultaría en una predicción de la radiación solar media para San Luis, con una precisión del orden del 1 % al 2 %.

Se desarrolla el concepto de la fracción del tiempo del cielo claro, se deriva la relación entre las horas de sol y de la radiación, y se expresa esta fracción en términos de cantidades globales de la radiación. Las cantidades medias mensuales de radiación difusa se pueden relacionar con las cantidades globales correspondientes de la radiación (directa + difusa) usando la relación difusa de la fracción por Page (1961):

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1 - c\bar{K} \quad (4)$$

donde \bar{H}_d es la radiación difusa de la superficie horizontal diaria mensual del promedio, y \bar{H} es la radiación global diaria del promedio mensual (directa + difusa), c es una constante y \bar{K} es el índice diario de la claridad del promedio mensual.

En una comparación estadística de las varias relaciones difusas de la fracción, la relación (3) antedicha se ha encontrado para ser simple y exacta. La relación también ha sido verificada por el autor y una constante empírica virtualmente idéntica a la constante $c = 1.11$ fue obtenida para Perth, Australia (Suehrcke y McCormick, 1988).

La figura 4 muestra la relación con $c = 1,13$ propuesta por Page (1961) y los datos experimentales con su respectiva línea de tendencia para la Ciudad de San Luis.

Se encuentra la cantidad de día muy nublados, parcialmente nublados y con cielo claro, según el valor del índice de claridad. Se obtienen las gráficas de K_d respecto a K_t , para cada uno de los intervalos tomados. Durante los días muy nublados la radiación difusa es igual a la radiación global; durante los días parcialmente nublados la radiación difusa oscila entre un 20 % y un 35 % de los valores de la radiación extraterrestre.

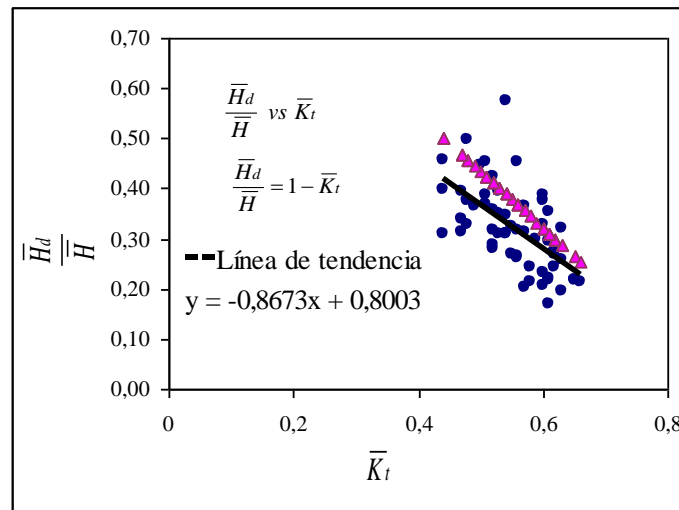


Figura 4: Datos de la fracción difusa en relación con el índice d claridad.

En la Figura 5 se muestra la gráfica de K_d vs. K_t , donde se observa la distribución para el trimestre febrero-marzo-abril del año 2002, y se pueden distinguir las proporciones de puntos que se encuentran con valores de $K_t \leq 0,3$, $0,3 < K_t < 0,7$, y $K_t \geq 0,7$. Esta distribución es típica según la variación de la radiación difusa diaria como función del índice de claridad propuesta por Iqbal (1983).

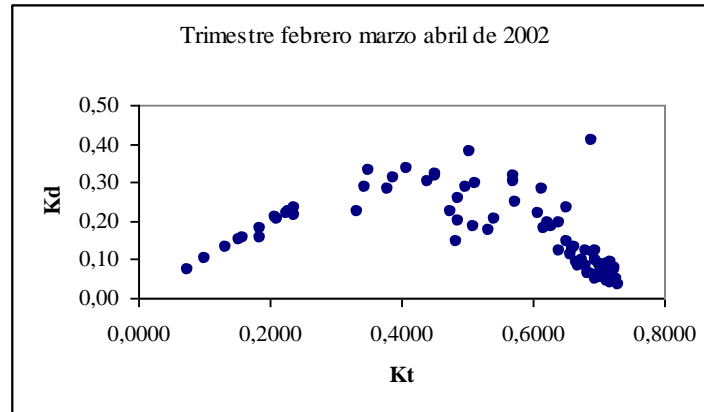


Figura 5: Distribución de la radiación difusa como una función del índice de claridad.

3 CONCLUSIONES

Se verifican las relaciones propuestas por Suehrcke entre la fracción de cielo claro y el índice de claridad, y su aproximación con los valores experimentales de cinco años de medición para la ciudad de San Luis.

Con los datos de radiación registrados en San Luis, se encuentra que los modelos de Ångström-Prescott, Reitvel, Glover-McCulloch y Suehrcke ajustan bien. Entre ellos, se distingue el de menor error, que es el modelo de Suehrcke, considerando un valor de $K_{clear} = 0,68$.

Se encuentra la correlación entre $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ y \bar{K} , verificando su relación lineal con pendiente negativa y su semejanza con la relación de Page.

La relación de Suehrcke es una valiosa alternativa para estimar valores de radiación solar global, dado que se utiliza como base información las horas de sol, información que se encuentra disponible en más estaciones y de mayor extensión temporal.

4 REFERENCIAS

- Black J. N., Bonython C. W. and Prescott J. A. (1954) Solar radiation and the duration of sunshine. Q. J. R. Met. Soc. 80, pp. 231- 235.
- Glover J. and McCulloch J. S. G. (1958) The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. Q. J. R. Meteorol. Soc. 84, pp. 172-175.
- Iqbal M. (1983). An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, New York.
- Page J. K. (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. In Proceedings of United Nations Conference on New Sources of Energy, Paper S/98, Vol. 4, pp. 378-390, Rome.
- Reitvel M. R. (1978) A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. Agr. Meteorol. 19, pp. 243-252.
- 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), pp. 417-425.
- Suehrcke H. and McCormick, P. (1988). The diffuse fraction of instantaneous solar radiation. Solar Energy 40, p. 423.
- Torres Deluigi M. y Fasulo A. (2002) Aplicación y evaluación experimental de la ecuación de Suehrcke para calcular la fracción de días claros a través del índice de claridad. Avance en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 6 N° 2. pp. 11.19-11.24.