

COMPORTAMIENTO DE LA RAZON DIFUSA/GLOBAL DE RADIACION SOLAR PARA INDICES DE CLARIDAD MEDIO Y ALTO SOBRE LA BASE DE MEDICIONES INSTANTANEAS EN ROSARIO, ARGENTINA

E. A. Luccini¹, M. A. Parodi^{1,2} y R. D. Piacentini^{1,2,3}

1. Grupo de Energía Solar, Instituto de Física Rosario (CONICET-UNRosario), 27 de febrero 210 Bis, 2000 Rosario, Argentina. Fax: 041-821772.
2. Fac. Cs. Exactas, Ing. y Agrim. (UNRosario), Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina. Fax: 041-802654.
3. Observatorio Astronómico de Rosario, CC 606, Parque Urquiza, 2000 Rosario, Argentina. Telefax: 041-802554. E-mail: ruben@ifir.ifir.edu.ar

RESUMEN

Se estudia la correlación entre la razón difusa/global (I_d/I) de las intensidades de radiación solar y el índice de claridad k_t , utilizando una base de datos de 4 años de mediciones instantáneas a mediodía solar en la ciudad de Rosario (32.96° S, 60.62° W, 20 m. s.n.m.). Se encuentran los parámetros de ajuste para una correlación tipo Liu-Jordan [$I_d/I = f(k_t)$] y se comparan con trabajos previos. Se analiza, a través de las mediciones y el modelo C de Iqbal, la dependencia sistemática con el ángulo de elevación solar en los valores de días de cielo despejado, y su necesaria incorporación como predictor del comportamiento de la radiación difusa. Se comparan los resultados utilizando mediciones instantáneas de radiación respecto de aquellos basados en promedios temporales.

INTRODUCCION

Es fundamental, en el diseño de sistemas de aprovechamiento de energía solar, la determinación de la radiación incidente sobre las superficies colectoras. Este problema estaría resuelto si se dispusiera de un registro completo de mediciones sobre los colectores, en el lugar y orientaciones correspondientes, pero este no es el caso habitual. En la mayoría de las situaciones, y como una base de datos suficientemente completa, sólo están disponibles mediciones de radiación global y difusa sobre plano horizontal y, eventualmente, de radiación directa. Es necesario entonces el empleo de modelos que, a partir de estas mediciones, permitan determinar la radiación total incidente sobre plano inclinado, constituida por la radiación directa, difusa y reflejada por el suelo que inciden sobre la superficie colectoras orientada en una determinada dirección (Bugler, 1977; Reindl, 1988). Como requisito básico, es necesario conocer la fracción de radiación difusa presente en la radiación global sobre plano horizontal, lo cual se sistematiza por medio de los modelos empíricos del tipo de Liu-Jordan en una representación en función del índice de claridad k_t , definido como la razón de la radiación global a la extraterrestre, ambas sobre plano horizontal (Liu y Jordan, 1960; Ruth y Chant, 1976; Tuller, 1976; Orgill y Hollands, 1977; Bugler, 1977; Reindl et al, 1990; Chendo y Maduekwe, 1994; Chandrasekaran y Kumar, 1994; Collares-Pereira, 1997). Los modelos tipo Liu-Jordan son aplicables a todo intervalo de integración o promediado temporal de irradiancias medidas, desde valores instantáneos, horarios, diarios hasta mensuales (Duffie y Beckman, 1980).

No obstante, la marcada dispersión de puntos que se observa para un dado valor de k_t es un fuerte indicio de que otras variables condicionan el comportamiento de la razón I_d/I . En un detallado análisis, basado en dosis horarias de radiación, Reindl et al. (1990) demuestran que los cuatro predictores fundamentales asociados son: el índice de claridad, el seno del ángulo de elevación solar (AES), la temperatura ambiente y la humedad relativa. Estos autores proponen un modelo donde el ajuste está dado por una combinación lineal de dichos predictores, formalismo que es utilizado posteriormente por Chendo y Maduekwe (1994). Sin embargo, aún los signos de las contribuciones de cada predictor discrepan en ambos trabajos.

En este trabajo se utiliza una base de datos de mediciones instantáneas de irradiancia, a la que se le aplica un modelo simple del tipo Liu-Jordan de ajuste en función del índice de claridad, y se realiza un análisis de la dependencia sistemática con el AES en las mediciones a cielo despejado, y de la base física de su incorporación como predictor en el comportamiento de la fracción difusa de radiación.

MEDICIONES

Se analiza una base de datos de 4 años (1994-1998) de mediciones de irradiancia solar global y difusa (esta última utilizando círculo de sombra) con un piranómetro Kipp & Zonen CM5, en el Observatorio Astronómico de Rosario (32.96° S, 60.62° W, 20 m s.n.m.). Se realizaron sistemáticamente tres mediciones diarias en un intervalo de tiempo de $\pm 1/2$ hora alrededor del mediodía solar. El tiempo de estabilización del instrumento es de aproximadamente 2 minutos, de modo que el tiempo transcurrido, procurando siempre que sea mínimo, entre una medición de irradiancia global y la correspondiente de difusa es de unos 5 minutos. Con este procedimiento hay una alta probabilidad de que, aún en caso de nubosidad, la medición se realice con Sol directo descubierto, por lo cual nuestro análisis está basado principalmente en casos de índice de claridad medio y alto, que corresponde a la mayoría de los puntos obtenidos.

ANALISIS

1.) Ajuste tipo Liu-Jordan

La figura 1 muestra la fracción difusa/global de intensidades de radiación solar, I_d/I , en función de $k_t = I/I_0$, según las

mediciones obtenidas. Como se señaló, la mayoría de los puntos corresponden a casos de índice de claridad medio y alto. El cúmulo de puntos en valores altos de k_t corresponde a mediciones a cielo despejado.

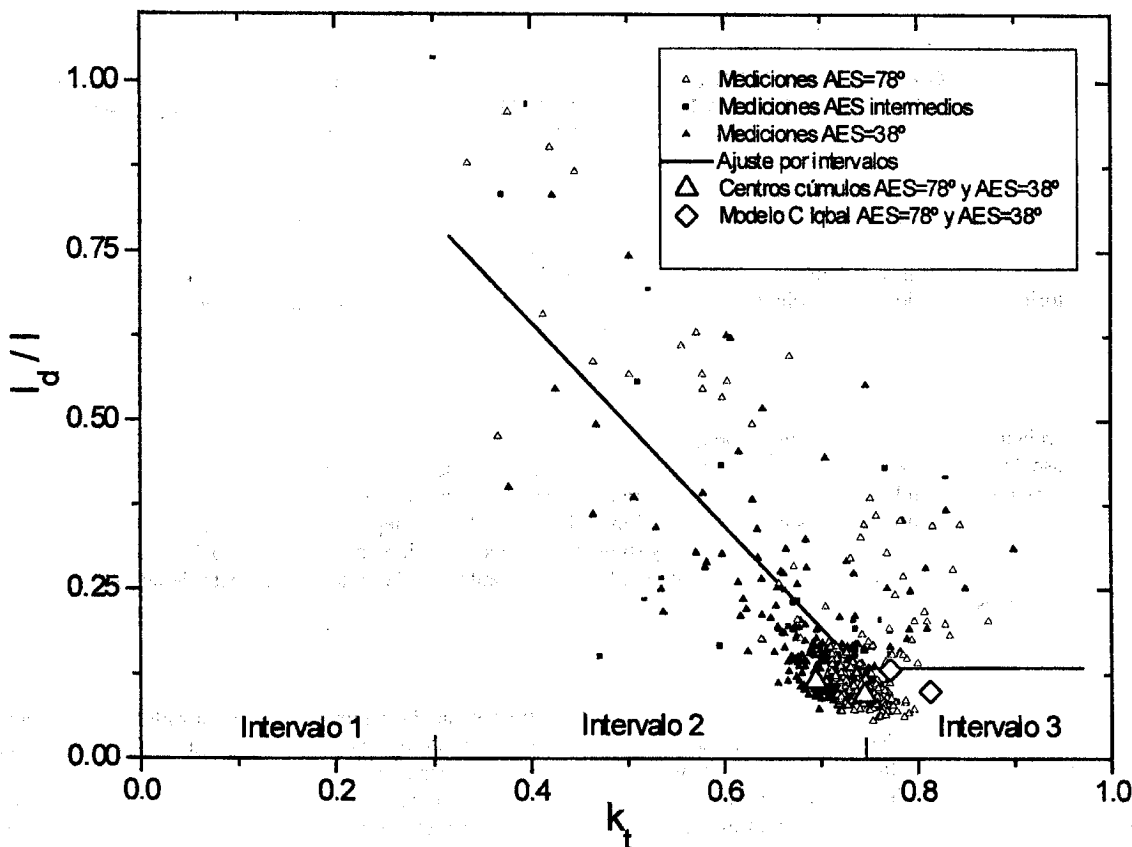


Fig. 1. Razón de irradiancia difusa/global en función del índice de claridad medidos en el Observatorio Astronómico de Rosario entre 1994-1998, junto con las rectas de ajuste en los intervalos con datos disponibles. Los puntos medidos (triángulos grandes) y modelizados (rombos) con índice de claridad mayor corresponden a AES=78°, y con índice de claridad menor a AES=38°.

En base a un análisis detallado, realizado por Reindl et al. (1990), se distinguen tres intervalos de k_t :

Intervalo 1: $0 \leq k_t < 0.3$

Dado que no se dispone de puntos experimentales, lo analizaremos en términos de los resultados del siguiente intervalo. Referencias previas muestran un ajuste lineal

$$I_d/I_g = A_1 * k_t + B_1$$

Intervalo 2: $0.3 \leq k_t \leq 0.74$

El extremo mayor del intervalo se eligió como el valor de k_t para el centro del cúmulo de puntos correspondiente a AES=78° en días de cielo despejado. Se realiza un ajuste lineal incluyendo todos los puntos disponibles.

$$I_d/I_g = A_2 * k_t + B_2$$

Intervalo 3: $0.74 < k_t$

con un valor constante de I_d/I_g definido por el extremo del intervalo anterior.

$$I_d/I_g = B_3$$

Los parámetros de ajuste se presentan en la tabla 1 (ver en el Apéndice el detalle del procedimiento de cálculo), junto con resultados de trabajos previos similares. Las incertezas en los parámetros representan un ajuste fuertemente dominado por la mayor densidad de puntos con índices de claridad altos, y el análisis de errores relativos por tramos detallado en el Apéndice.

Tabla 1. Parámetros de ajuste obtenidos a partir de mediciones de irradiancia instantánea en el Observatorio Astronómico de Rosario, comparados con ajustes de trabajos previos basados en promedios horarios.

	Intervalo 1		Intervalo 2		Intervalo 3
	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂	B ₃
Presente trabajo	----	----	-1.5 ± 0.1	1.2 ± 0.1	0.13 ± 0.02
Chendo y Maduekwe (1994)	-0.156	1.022	-1.396	1.385	0.264
Reindl et al. (1990)	-0.248	1.020	-1.67	1.45	0.147
Orgill y Hollands (1977)	-0.249	1.0	-1.84	1.557	0.177

2.) Dependencia con el ángulo de elevación solar.

En la figura 1 se observa, en los puntos medidos correspondientes a días de cielo despejado, una dependencia con el AES que implica un sistemático desplazamiento de los puntos hacia valores menores de k_t y mayores de I_d/I , conforme disminuye el AES. Esta dependencia se explica razonablemente por el incremento de la dispersión al aumentar el camino óptico de la radiación solar (aumenta la proporción de radiación difusa en la global I_d/I) y la simultánea disminución de radiación global (la disminución de radiación directa domina por sobre el incremento de difusa) respecto de la extraterrestre sobre plano horizontal (disminuye k_t), en tanto disminuye el AES. Esta relación ha sido ampliamente verificada tanto a través de mediciones (Bugler, 1977) como de cálculos con modelos para cielo despejado en el presente trabajo.

Para cuantificar tal dependencia, se identificaron los puntos centrales de los cúmulos de puntos de mediciones a cielo despejado correspondientes a los AES extremos ($78^{\circ} \pm 3^{\circ}$ y $38^{\circ} \pm 3^{\circ}$), por medio de histogramas en cada uno de los ejes. Los puntos así identificados se observan en la figura 1, junto con puntos resultantes de cálculos mediante el modelo C de Iqbal (Iqbal, 1983), el cual cuenta con una alta confiabilidad de precisión respecto de mediciones y modelos más sofisticados (Gueymard, 1993). Los cálculos se realizaron para AES= 78° y AES= 38° , con los siguientes valores fijos de los parámetros atmosféricos: presión atmosférica=1000 hPa, ozono=300 UD, vapor de agua precipitable=1 cm, aerosoles: $\alpha=0.84$, $\beta=0.04$, albedo=0.20

Tabla 2. Desplazamiento relativo de los puntos correspondientes a días de cielo despejado, medidos y modelizados, evidenciando la dependencia sistemática con el ángulo de elevación solar, en este caso entre AES= 78° y AES= 38° .

	Desplazamiento porcentual	
	Δk_t	$\Delta(I_d/I)$
Mediciones	-6.7 %	+21 %
Modelo C Iqbal	-5.0 %	+32 %

Si se asume la linealidad de la respuesta del instrumento, la constante de calibración del mismo no tendrá incidencia en I_d/I , pero sí en k_t por la forma en que está definido. Posibles errores en la constante de calibración del instrumento se verán reflejadas en discrepancias con los valores de k_t predichos por el modelo. También se tiene la limitación de utilizar valores estimados de los parámetros en los cálculos del modelo. Por tales motivos, se decidió determinar el desplazamiento relativo de los puntos medidos y calculados, que se muestra en la tabla 2. Entonces se obtuvo para AES= 78° y AES= 38° , en ambos casos, el desplazamiento relativo que implica la disminución en k_t respecto del mayor valor, y el aumento simultáneo en I_d/I respecto del menor valor.

CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis del comportamiento de la fracción difusa/global de radiación solar, basado en mediciones instantáneas de irradiancia global y difusa. Se propone una parametrización de la misma de tipo Liu-Jordan, en función sólo del índice de claridad. La solución propuesta consiste en ajustes de rectas en los intervalos de índice de claridad medio y alto.

Entre las ventajas de abordar el problema mediante mediciones instantáneas debemos mencionar la precisión con que es posible determinar el AES, a diferencia de los promedios horarios que incluyen siempre un rango relativamente amplio de variación del AES durante la hora promediada. También la medición instantánea permite, en caso de disponer de una cantidad importante de datos, estudiar en detalle el intervalo de índices de claridad superiores al esperado en días de cielo despejado, dado que estas mediciones se dan en casos de nubosidad parcial sin cubrir el Sol directo, donde las nubes incrementan marcadamente la radiación por dispersión múltiple y reflexión por bordes (Piacentini et al, 1998), y esta situación es menos probable en intervalos de integración temporal ya que habitualmente el Sol directo queda ocasionalmente cubierto durante ese intervalo de tiempo. Aquí se ha simplificado el tratamiento en este caso, considerando una recta de pendiente nula, tal cual algunas referencias previas (Orgill y Hollands, 1977; Reindl et al, 1990; Chendo y Maduekwe, 1994).

En el presente estudio se tiene la limitación de disponer de un único instrumento para las mediciones de irradiancia global y difusa, donde en casos de nubosidad las condiciones pueden variar significativamente durante el tiempo de medición. El sistema de medición implementado, de tres mediciones diarias alrededor del mediodía solar, hace que se disponga de escasos puntos de nubosidad, razón por la cual el análisis se centra en casos de índice de claridad medio y alto.

Con el fin de sentar una base física para la incorporación del AES como predictor del comportamiento de la fracción difusa, y haciendo uso de la mayoría de puntos disponibles, hemos analizado la dependencia sistemática con dicho ángulo de los valores de días de cielo despejado, basados en la evidencia experimental, y fundamentada mediante cálculos con un modelo paramétrico a cielo despejado de probada eficiencia, el modelo C de Iqbal.

Los resultados del análisis entre AES= 78° y AES= 38° , presentados en la figura 1, muestran una diferencia en los valores de los índices de claridad correspondientes, atribuible en principio a una imprecisión en la calibración del instrumento o, eventualmente, a los parámetros atmosféricos ingresados en el modelo. También hay una diferencia en I_d/I . Por este motivo, el análisis de la tabla 2 sólo contempla el desplazamiento relativo de los puntos, que coincide plenamente de manera cualitativa.

Se observa que el aumento relativo de la fracción de radiación difusa previsto por el modelo es mayor que el registrado por las mediciones. En tal sentido, nuestro estudio se basa únicamente en la dependencia con el índice de claridad y el AES como los dos principales predictores. El trabajo previo de Reindl et al. (1990) encuentra que los siguientes predictores en orden de

importancia son la temperatura ambiente y la humedad relativa, aunque, como se señaló anteriormente, distintos trabajos muestran discrepancias aún en el signo de estas contribuciones.

Debe resaltarse que, en el presente caso, la dependencia con el AES se obtiene a partir de datos con una estacionalidad intrínseca, ya que los AES mayores corresponden a mediodías solares próximos al solsticio de verano, y los AES menores al solsticio de invierno. En Rosario, ambas estaciones tienen características muy distintas: temperatura media más elevada y menor humedad relativa en verano. De modo tal que en un estudio más detallado la intervención de estos predictores debe ser incluida, y puede, eventualmente, disminuir las discrepancias antes indicadas entre las mediciones y el modelo.

Otro resultado particular es el bajo valor de la razón difusa/global en días de cielo despejado en la ciudad de Rosario, aún para AES intermedios, que se observa en el valor constante de I_d/I en el Intervalo 3 de análisis de las mediciones, comparado con resultados de referencias en otras localidades (ver tabla 1), aunque este resultado está condicionado, por ejemplo, por la elección de los extremos de los intervalos en cada caso.

AGRADECIMIENTOS

A los Sres José Pomar, por el apoyo técnico en la realización de las mediciones y Pablo García, por la colaboración en el procesamiento de datos. Este trabajo fue realizado con el apoyo parcial de un Subsidio PIA del CONICET y de las becas de doctorado FOMECE/Ministerio de Educación de la Nación de los Lic. Eduardo Luccini y Miguel Parodi.

REFERENCIAS

- Bugler J.W. (1977) "The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation". *Solar Energy* 19 477-491.
- Chandrasekaran J. y Kumar S. "Hourly diffuse fraction correlation at a tropical location". *Solar Energy* 53 505-510.
- Chendo M.A.C. y Madueke A.A.L. (1994) "Hourly global and diffuse radiation of Lagos, Nigeria. Correlation with some atmospheric parameters". *Solar Energy* 52 247-251.
- Collares-Pereira M. (1997) "Ingeniería del Secado Solar". Capítulo 2. Editado por CYTED-D.
- Duffie J.A. y Beckman W.A. (1980) "Solar Engineering of Thermal Processes". Edit. John Wiley.
- Gueymart C. (1993) "Critical analysis and performance assessment of clear sky irradiance models using theoretical and measured data". *Solar Energy* 51 121-138.
- Iqbal. M. (1983) "An introduction to solar radiation". Editorial Academic Press, New York, EUA.
- Liu B.Y. y Jordan R.C. (1960) "The interrelationship and characteristic distribution of direct, difuse and total solar radiation". *Solar Energy* 4 1-19.
- Orgill J.F. y Hollands K.G.T. (1977) "Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface". *Solar Energy* 19 357-359.
- Piacentini R.D., Cede A. y Bárcena H. (1998) "Solar intensities higher than the solar constant measured near the summer solstice at the Puna of Atacama (Argentina)" *Workshop Understanding Stratospheric Ozone and UV-B Radiation: Past accomplishments and future opportunities*. Buenos Aires.
- Reindl D.T. (1988) "Estimating difusse radiation on horizontal surfaces and total radiation on tilted surface". Tesis Doctoral. Universidad de Wisconsin-Madison. Madison.
- Reindl D.T., Beckman W.A. y Duffie J.A. (1990) "Diffuse fraction correlations". *Solar Energy* 45 1-7.
- Ruth D.W. y Chant R. (1976) "The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada". *Solar Energy* 18 153-154.
- Tuller S.E. (1976) "The relationship between diffuse, total and extra terrestrial solar radiation". *Solar Energy* 18 259-263.

APENDICE: PROCEDIMIENTO DE CALCULO DE AJUSTE LINEAL EN INTERVALO 2

Para realizar el ajuste en el intervalo 2 se lo dividió en tramos de paso 0.1 en k_t , en cada uno de los cuales se calculó el valor medio de I_d/I con su desviación estándar, tal cual se muestra en tabla A1, y se realizó un ajuste lineal pesado con dichos puntos asignados al centro de cada tramo en k_t . La mayor densidad de puntos en índices de claridad altos domina el ajuste, y la incerteza relativa porcentual, semejante en todos los tramos, se traduce en mayores incertezas en los parámetros de ajuste pesado, comparados a una regresión lineal sin consideración de los pesos estadísticos de cada punto.

Tabla A1. Promedios por tramos en índice de claridad con sus correspondientes desviaciones estándar e incertezas relativas, utilizados en el ajuste pesado lineal en el intervalo 2.

Intervalo promediado	Valor medio	Incerteza relativa porcentual
$0.3 < k_t \leq 0.4$	0.70 ± 0.24	34 %
$0.4 < k_t \leq 0.5$	0.61 ± 0.20	33 %
$0.5 < k_t \leq 0.6$	0.46 ± 0.18	39 %
$0.6 < k_t \leq 0.7$	0.21 ± 0.12	57 %
$0.7 < k_t \leq 0.8$	0.13 ± 0.05	38 %