

**APLICACIONES DEL MODELO DE BARBARO *et al.* PARA EL CALCULO
DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL POR MEDIO DE ESTIMACIONES
DE LAS COMPONENTES DIRECTA Y DIFUSA, EN LIMON Y PUNTARENAS,
COSTA RICA, PARA EL PERIODO 1970-1972***

Jaime Wright Gilmore

Departamento de Física
Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

RESUMEN

El presente trabajo utiliza un modelo atmosférico propuesto por Barbaro et al. (1979) para el cálculo de la radiación solar global por medio de estimaciones de las componentes directa y difusa, en Limón y Puntarenas, Costa Rica, con base en datos recolectados por el Instituto Meteorológico Nacional para el periodo 1970-1972.

Los resultados son presentados en forma de valores medios mensuales y comparados con datos observados de la radiación global. En todos los casos se obtiene un porcentaje de error no mayor del ± 8.5 por ciento.

En este artículo se verifica la aplicabilidad de este modelo para el cálculo de la radiación solar global media en las estaciones de Limón y Puntarenas. No es posible verificar las componentes directa y difusa, debido que en ambas estaciones meteorológicas no existen aparatos medidores de radiación directa y difusa.

Se recomienda extender la aplicación del modelo en otros lugares de Costa Rica donde existan estaciones actinométricas, con el objeto de lograr una mejor verificación de su validez en la

predicción de la radiación solar en lugares que carecen de datos actinométricos.

ABSTRACT

The present work uses an atmospheric model proposed by Barbaro et al., for the computation of the global solar radiation through the estimations of the direct and diffuse components, in Limon and Puntarenas, Costa Rica for the period 1970-1972.

The results are presented in the form of monthly averages and compared with the observed values provided by the Meteorological Institute of Costa Rica. The percentage of error does not exceed ± 8.5 per cent.

It is not possible to verify the computation of the direct and diffuse components, because in Limon and Puntarenas there is no direct nor diffuse solar radiation data.

* El presente trabajo es parte del proyecto de investigación "Un modelo para la estimación de la radiación solar directa, difusa y global en Costa Rica". No. 851014, financiado por la Universidad Nacional.

In order to verify its reliability, it is recommended to apply the model to other locations equipped with actinometric stations in Costa Rica. This will allow one to predict the solar radiation on locations lacking actinometric data.

INTRODUCCION

El conocimiento cuantitativo de la radiación solar disponible en un lugar dado en la superficie terrestre es, de hecho, un factor importantísimo para el buen diseño y eficiente explotación de los aparatos que utilizan energía solar. En lugares en los que no existen aparatos medidores de radiación solar es necesario, en algunas ocasiones, estimar la radiación solar incidente en términos de otras cantidades fundamentales medibles en la atmósfera, como el grueso óptico de la masa de aire, concentración de vapor de agua y contenido de polvo o aerosoles en la atmósfera.

La radiación solar recibida en cualquier localidad tiene una componente directa y una componente difusa. La radiación directa es la única componente susceptible de ser concentrada utilizando colectores concentradores; sin embargo, la radiación difusa permite también importantes ganancias de energía, aun con cielo cubierto de nubes, utilizando colectores planos.

Varios modelos atmosféricos se han propuesto para la estimación de la radiación global, basados principalmente en la componente directa de la radiación solar para cielo despejado. Entre los prominentes están los modelos de Fowle (1913), Moon (1940) y Boer (1977), los cuales requieren una integración espectral sobre todas las longitudes de onda. Mc Clatchey *et al.* (1972) presentan un análisis completo en términos de conceptos fundamentales y expresiones para climas específicos y Hottel (1976) seguidamente estableció un modelo basado en esos climas. Cole (1976) formuló un modelo para la masa de aire atmosférica m en el rango $m = 1-5$ y para un contenido de polvo y aerosoles igual a 400 partículas/cm³. Barbaro *et al.* (1979) e Ideriah (1981), han sido de los pocos que han incursionado en la predicción de la radiación directa y difusa en un cielo nuboso. La primera aplicación del modelo de Barbaro *et al.* (1979) fue realizado en Palermo en condiciones de un clima mediterráneo y probado posteriormente por Badescu (1981) en Bucarest, para un clima continental.

En el presente trabajo se prueba la validez del modelo de Barbaro *et al.* (1979) en condiciones de un clima tropical.

Con el objeto de evitar los posibles errores asociados al hecho de que los radiómetros no han sido calibrados periódicamente, en todos los cálculos se han utilizado los datos de períodos no mayores de tres años después de la instalación de los instrumentos.

MATERIAL Y METODOS

Radiación directa

Cole (1976) determinó el efecto de atenuación del agua precipitable w , suponiendo un contenido de polvo en la atmósfera ($d = 400$ partículas/cm³) y una masa de aire atmosférica en el rango $m = 1-5$, y derivó una expresión general para el cálculo del valor instantáneo de la radiación solar directa I_z , después que ésta ha atravesado una distancia m , por medio de la siguiente relación:

$$I_z = I_e \exp [a_1 + b_1 w - a_3(d-400)] * \exp [-(a_2 + b_2 w + b_3(d-400))m] \quad (1)$$

donde: I_e es la irradiancia en el tope de la atmósfera en $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ para un día N del año y expresado como:

$$I_e = I_0 [1 + 0.035 \cos 2\varphi (N-4) / 366] \quad (2)$$

I_0 , es la energía del Sol por unidad de tiempo, recibida por unidad de área, en la superficie perpendicular a la radiación fuera de la atmósfera en $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$. w , es la profundidad del agua precipitable en la atmósfera. Los coeficientes de regresión exponencial de las relaciones I_z/I_0 versus m y I_z/I_0 versus w tienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned} a_1 &= -0.13491 & b_1 &= -0.00428 & a_2 &= 0.13708 \\ b_2 &= 0.00261 & a_3 &= 0.368 \cdot 10^{-4} \\ b_3 &= 1.131 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Como en Limón y Puntarenas no existen datos de radiosondeo, se utilizó la ecuación de Stratton (1956) para obtener una aproximación del agua precipitable w de la siguiente forma:

$$w = 2\zeta_0 \quad (3)$$

donde ζ_0 es el contenido de vapor de agua en g/m^3 al nivel del mar, y se puede obtener de la ecuación $\zeta_0 = m \cdot \text{HR}$, donde HR es el valor porcentual de la humedad relativa y m es la densidad de la masa del vapor de agua saturado.

La radiación directa total diaria I_C , se obtiene de la ecuación (1) multiplicando por $\cos z$ e integrando durante todo el día solar.

$$I_C = \int_{t_1}^{t_2} I_Z \cos z \, dt \quad (4)$$

donde los límites de integración t_1 y t_2 son respectivamente el orto y el ocaso y z es el ángulo cenital.

La radiación solar directa decrece con la presencia de la nubosidad por factores que dependen del tipo de nubes. En presencia de una adecuada información de la nubosidad, este factor se puede relacionar con la heliofanía relativa, s/S , que es el cociente entre el número de horas de sol reales y posibles.

Así, la radiación directa para un cielo nublado, I_n , se puede expresar como:

$$I_n = (s/S) I_C \quad (5)$$

Radiación difusa

La radiación difusa es producida por la dispersión de los rayos solares, y cuando el Sol está oculto por una nube es la única radiación que llega al suelo. La cantidad de radiación difusa recibida depende del grado de nubosidad del cielo y de la cantidad de moléculas en el aire: vapor de agua, polvo y aerosoles en la atmósfera.

Las funciones de dispersión involucradas en el cálculo de la radiación difusa son muy complejas para estimarse con modelos analíticos. Para días claros un modelo analítico se podría usar si los datos de aerosoles y el perfil vertical de vapor de agua estuvieran disponibles (Wright, 1988), pero raramente se dan; es conveniente, por lo tanto, utilizar fórmulas empíricas basados en mediciones experimentales. La radiación difusa instantánea, D_z , que llega de un cielo despejado (día claro) en

un plano horizontal, se puede calcular por la siguiente relación:

$$D_z = k_z (I_{WZ} - I_Z) \quad (6)$$

donde k_z es un coeficiente empírico que depende de la altitud solar, I_{WZ} es el valor instantáneo de la radiación total diaria y I_Z es el valor instantáneo de la radiación solar directa definido previamente en la ecuación (1). Para un albedo cercano a 0.25, k_z se puede expresar por la relación de Robinson (1966).

$$k_z = 0.5 \cos^3(z) \quad (7)$$

Tomando en cuenta que la mayor contribución de absorción de radiación solar es debida al vapor de agua en la atmósfera, Barbaro *et al* (1979) reprodujeron con una buena aproximación los valores obtenidos por Mac Donald (1960) para estimar el valor instantáneo de la radiación total diaria I_{WZ} , en la superficie terrestre, utilizando la siguiente fórmula:

$$I_{WZ} = I_e [0.938 \exp(-0.0154 \, mw) + 0.004 (mw)^2 - 1.1086 \cdot 10^{-5} (mw)^3 + (121.948 (1+mw)) / (1 + 10(mw)^2)] \quad (8)$$

donde mw , representa el grueso real de la capa de agua precipitable, expresada en mm de agua, I_{WZ} y I_e en $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$.

La radiación difusa, D_C , se puede obtener de la ecuación (6) multiplicando por $\cos z$, e integrando para todo el día solar.

$$D_C = \int_{t_2}^{t_1} D_z \cos z \, dt \quad (9)$$

En presencia de nubosidad, la radiación difusa D_n se puede calcular como:

$$D_n = D_C \frac{s}{S} + k^* (1-s) \frac{(I_C + D_C)}{S} \quad (10)$$

CUADRO 1. Valores del coeficiente k^* para diferentes latitudes L^0 .

L^0	75	70	65	55	50	45	40
k^*	0.55	0.50	0.45	0.38	0.36	0.34	0.33
L^0	35	30	25	15	10	5	0
k^*	0.32	0.32	0.33	0.33	0.34	0.34	0.35

donde k^* es un coeficiente de transmisión empírico, dado por Berland y Danilchenko (1961) para diferentes latitudes, y sus valores se presentan en el Cuadro 1.

Se utilizaron datos climáticos de humedad relativa y temperatura del aire para calcular la profundidad del agua precipitable w , y número de horas de brillo solar, tomados con equipo del Instituto Meteorológico Nacional, situado en Limón (lat. $10^{\circ} 00' N$, long. $83^{\circ} 02' W$; altitud 5 m) y Puntarenas (lat. $9^{\circ} 58' N$, long. $84^{\circ} 50' W$; altitud 5 m) para los periodos anteriormente citados y presentados en los Cuadros 2 y 3.

En la aplicación del modelo se utilizó un factor $k^* = 0.34$ para la latitud 10° Norte (según Berland y Danilchenko, 1961), (Cuadro 1) y se consideró un contenido de polvo $d = 200$ partículas/cm³ (se estimó este valor por cuanto en Costa Rica no existen mediciones directas de polvo atmosférico) para una atmósfera limpia (ver Barbaro *et al.*, 1979, Ideriah, 1981; y Badescu, 1981) en Limón y Puntarenas.

Siguiendo con la metodología anteriormente descrita, se calcularon los valores diarios mensuales de las siguientes cantidades:

a. Radiación directa I_n ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$) y di-

fusa D_n ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$) en un cielo cubierto.

b. Radiación global G ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$) obtenida por la suma de I_n y D_n .

Los valores mensuales de las cantidades anteriormente citadas son calculadas y presentadas en los Cuadros 4 y 5. También se presentan en esos mismos cuadros los valores diarios medios mensuales de la radiación global calculada G y observada F y el porcentaje de error entre ellos, cuyo valor no excede el 8.5 por ciento, lo que indica que los valores de la radiación global en Limón y Puntarenas se pueden determinar razonablemente con este método.

CONCLUSIONES

Se usó un modelo atmosférico para el cálculo de la radiación solar directa y difusa recibida en la superficie terrestre sobre un plano horizontal en Limón y Puntarenas. El modelo es basado en el propuesto por Barbaro *et al.* (1979) para el cálculo de la radiación solar directa y difusa en cielo cubierto y despejado. El modelo permite calcular independientemente la radiación solar directa y difusa como función de las coordenadas y geográficas del lugar, declinación solar, agua precipitable y datos de horas de sol.

CUADRO 2. Valores diarios medios mensuales de la temperatura T , humedad relativa HR , heliofanía relativa s/S y la profundidad del agua precipitable w en Limón, Costa Rica (1970-1972).

Meses	T ($^{\circ}C$)	HR (%)	s/S	w (mm)
Enero	24.1	87	0.38	38.5
Febrero	24.0	87	0.44	38.2
Marzo	25.0	85	0.43	39.5
Abril	25.6	84	0.48	40.4
Mayo	25.8	85	0.40	41.3
Junio	26.1	87	0.33	43.0
Julio	25.6	88	0.28	42.3
Agosto	25.7	86	0.39	41.6
Setiembre	25.7	85	0.41	41.1
Octubre	25.8	84	0.49	40.8
Noviembre	24.9	86	0.44	39.8
Diciembre	24.4	87	0.37	39.1

CUADRO 3. Valores diarios medios mensuales de la temperatura T, humedad relativa HR, heliofanía relativa s/S y la profundidad del agua precipitable w en Puntarenas, Costa Rica (1970-1972)

Meses	T (°C)	HR (°/o)	s/S	w (mm)
Enero	26.3	80	0.69	40.0
Febrero	27.6	70	0.79	36.0
Marzo	27.7	73	0.71	39.4
Abril	28.1	76	0.72	41.8
Mayo	27.0	85	0.51	44.3
Junio	26.9	88	0.45	45.3
Julio	27.3	86	0.39	45.6
Agosto	26.1	86	0.48	42.5
Setiembre	25.8	88	0.44	43.0
Octubre	25.8	88	0.48	42.6
Noviembre	25.6	87	0.55	41.8
Diciembre	26.1	80	0.65	39.3

CUADRO 4. Valores diarios medios mensuales de la radiación solar en Limón, Costa Rica (1970-1972). I_n es la radiación directa diaria en un cielo cubierto ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$); D_n es la radiación difusa diaria en un cielo cubierto ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$); G es la radiación global calculada ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$); F es la radiación global observada ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$).

Meses	I_n	D_n	G	F	°/oE
Enero	6.25	6.62	12.87	13.63	-5.6
Febrero	8.00	7.96	15.96	16.19	-1.4
Marzo	8.41	8.65	17.06	17.44	-2.2
Abril	9.53	8.72	18.25	18.08	0.9
Mayo	7.87	8.53	16.40	16.95	-3.2
Junio	6.17	8.26	14.43	14.39	0.3
Julio	5.35	8.45	13.80	15.08	-8.5
Agosto	7.63	8.57	16.20	15.52	4.4
Setiembre	7.97	8.54	16.51	15.88	4.0
Octubre	8.96	7.77	16.72	16.59	0.8
Noviembre	7.31	6.82	14.13	13.80	2.4
Diciembre	5.78	6.32	12.10	12.55	-3.5

CUADRO 5. Valores diarios medios mensuales de la radiación solar en Puntarenas, Costa Rica (1970-1972). I_n es la radiación directa diaria en un cielo cubierto ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$); D_n es la radiación difusa diaria en un cielo cubierto ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$); G es la radiación global calculada ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$); F es la radiación global observada ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$).

Meses	I_n	D_n	G	F	% E
Enero	11.09	5.88	16.97	17.79	-4.6
Febrero	14.69	7.63	22.32	20.68	8.0
Marzo	14.02	8.20	22.22	20.75	7.1
Abril	14.31	8.18	22.49	21.31	5.6
Mayo	9.69	8.07	17.76	18.62	-4.6
Junio	8.28	7.82	16.10	16.73	-3.7
Julio	7.29	7.95	15.24	18.31	-6.5
Agosto	9.31	8.33	17.64	18.01	-2.0
Setiembre	8.51	8.32	16.83	17.76	-5.3
Octubre	8.68	7.61	16.29	16.20	0.6
Noviembre	8.89	6.48	15.37	15.68	-2.0
Diciembre	10.16	5.75	15.91	15.07	5.6

Los resultados obtenidos en el cálculo de la radiación global, por la suma entre la componente directa y difusa, son satisfactorios, ya que el porcentaje de error entre el valor calculado y observado no excede el ± 8.5 % y los coeficientes de correlación lineal 0.90 (Limón) y 0.91 (Puntarenas) presentan resultados comparables con la fórmula de Angström utilizado por Wright (1980a y 1980b) en la estimación de la radiación global en Costa Rica. Sin embargo, para el caso de la radiación global continúa siendo más conveniente seguir usando Angström, ya que es una relación simple y solo requiere datos de horas de sol y latitud. El método de Barbaro *et al.* (1979) es más bien útil para estimar las componentes directa y difusa (que es el principal objetivo de esta investigación), ya que por lo general no se hacen mediciones de rutina de estos dos parámetros (solo la Estación Experimen-

tal Fabio Baudrit posee datos de este tipo, a partir de 1981).

En este trabajo se verificó la aplicabilidad de este modelo para el cálculo de la radiación solar global media en las estaciones de Limón y Puntarenas. No es posible verificar las componentes directa y difusa debido que en ambas estaciones meteorológicas no existen aparatos medidores de radiación directa y difusa.

Con el objeto de lograr una mejor verificación de su validez para todo el país, el autor ha asumido la tarea de aplicar el modelo a otras localidades donde existen estaciones actinométricas, esto permitiría la aplicación del modelo con mayor validez en la predicción de la radiación solar en lugares en los que no existen datos actinométricos.

LITERATURA CITADA

- Badescu, V. 1981. A verification of the atmospheric model proposed by Barbaro *et al.* for computing direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy* 26: 459-460.
- Barbaro, S., S. Coppolino, C. Leone y E. Sinagra. 1979. An atmospheric model for computing direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy* 22: 225-228.
- Berland, T.G. y V.Y. Danilchenko. 1961. The continental distribution of solar radiation. *Gidrometeoizdat, Leningrad*.
- Boer, K.W. 1977. The solar spectrum at typical clear weather days. *Solar Energy* 19: 525-538.
- Cole, R.J. 1976. Direct solar radiation data as input mathematical models describing the thermal performance of buildings. A review of existing relationship which predict the direct component of solar radiation. *Building and Environment*, Vol. II: 173-179, Pergamon Press, Oxford.
- Fowle, F.E. 1913. The non-selective transmissibility of radiation through dry and moist air. *Astrophysics*, J. 38: 392-406.
- Hottel, H. 1976. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmosphere. *Solar Energy* 18: 129-134.
- Iderlah, F. J.K. 1981. A model for calculating direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy* 26: 447-452.
- Mac Clatchey, R.A., R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.W. Voltz y J.S. Garing. 1972. Optical properties of the atmosphere. Air Force Cambridge Research Laboratories, AFCRL-72-0497, Envir. Res. Paper 411.
- Mac Donald, J.E. 1960. Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor. *J. Meteorol* 17 (3): 542-564.
- Moon, P. 1940. Proposed standard radiation curves of engineering use. *J. Franklin Ins.* 230 (5): 583-617.
- Robinson, N. 1966. *Solar radiation*. Elsevier, New York.
- Stratton, A.W. 1956. *Progress in Radio Science*. Vol. III p. 279, Elsevier, Amsterdam.
- Wright, J. 1980a. Estimación de la radiación solar global en Costa Rica utilizando horas de sol y otros datos meteorológicos. *Revista Geográfica de América Central*. No. 11-12: 157-166.
- Wright, J. 1980b. Correlación lineal entre la radiación solar global y otros parámetros climáticos en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*. No. 11-12: 167-172.
- Wright, J. 1988. Luminous efficacy of direct irradiance: Variations with insolation and Moisture Conditions. Master of Science Thesis, Department of Atmospheric Science. State University of New York at Albany, Albany, New York.