

Estimación de la radiación solar global de Costa Rica utilizando horas de sol y otros datos meteorológicos

*Jaime Wright Gilmore
Departamento de Física
Universidad Nacional*

RESUMEN. Se evalúa la eficacia en varios lugares de Costa Rica de las fórmulas empíricas más utilizadas en la estimación de la radiación global, según la literatura obtenida, en donde se comparan el valor estimado con el valor observado para las estaciones meteorológicas en estudio. Se obtiene el mejor método —de los tratados en este estudio— para estimar la radiación global en Costa Rica.

SUMMARY. Various empirical equations available for the estimation of global solar radiation have been utilized to calculate the total radiation in different places of Costa Rica. The calculated results have been compared with experimental results.

RESUME. Pour mesurer la radiation solaire globale au Costa Rica, on a comparé les résultats obtenus à partir des formules empiriques les plus courantes avec les valeurs observées localement. Ceci afin d'établir la méthode la plus efficace dans ce pays pour palier le manque d'information.

1. INTRODUCCION

Un hecho perfectamente conocido es el gran aporte de energía que el sol da a la Tierra. De esta energía una parte es interceptada por la atmósfera, una pequeña parte es absorbida por cientos de gases como ozono y vapor de agua, y otra parte es reflejada al espacio por las nubes, calculándose que aproximadamente llega al planeta sólo un 70 % de la energía que incide en la superficie terrestre. Esta energía es equivalente a la energía eléctrica producida por ciento veintitún millones de centrales eléctricas nucleares.

La creciente demanda de combustibles fósiles (petróleo y carbón), utilizados como energía por parte del mundo industrializado, ha causado que estos combustibles se encuentren en vías de extinción y ante esa situación, la tecnología se ha preocupado por investigar y elaborar proyectos sobre las fuentes de energía no convencional, en especial la energía solar.

En este trabajo discutiremos las fórmulas más utilizadas en la estimación de la radiación global sobre una superficie horizontal.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es hallar el mejor método para estimar la radiación global en Costa Rica.

Se analizará la mayoría de las fórmulas publicadas en la literatura obtenida, que utilizan datos medios mensuales de: brillo solar, número de días en el mes con precipitación (precipitación mayor de 0 mm), humedad relativa, temperatura máxima, porcentaje de posible brillo solar, etc.

2. DESCRIPCION DEL METODO

A Fórmula en función de las horas de sol

Angström (1924), fue el primero que se le ocurrió utilizar el brillo solar para estimar la radiación global media diaria mensual. Utilizó datos de radiación global y heliofanía relativa, siendo éste el cociente entre las horas de sol reales y las horas de sol posibles.

El tipo de ecuación de regresión de Angström relaciona la radiación media en un día claro de la localidad en cuestión, con la heliofanía relativa.

$$Q = Q' (a' + b' n/N) \quad (1)$$

donde: Q , es la radiación global en un plano horizontal para el período en cuestión; Q' , radiación global en un plano horizontal para un día claro para el mismo período; n , horas de sol reales para el mismo período; N , horas de sol posibles para el mismo período; a' , b' , constantes que dependen de la localidad y el clima de la estación.

La suma de los coeficientes de la ecuación (1) debe tener valores próximos a la unidad, $a' + b' = 1$, porque en días sin nubes $n/N = 1$ y $Q = Q'$. Esta ecuación

ción de regresión está basada en valores climáticos medios y no es recomendable aplicarlo a valores diarios. La ecuación de Angström, usualmente, da una sobreestimación de la radiación global en los días claros. No obstante, esto no quiere decir que no es posible derivar, satisfactoriamente, ecuaciones lineales para calcular valores medios mensuales de la radiación global.

Existen dificultades prácticas de importancia en la utilización de la forma original de la ecuación de Angström.

(a) La definición de la heliofanía es ambigua. Algunos investigadores han aplicado correcciones, porque se ha comprobado que los registros del sol no quedan la banda del heliógrafo hasta que los rayos del sol lleguen a cierta intensidad crítica.

(b) El valor preciso de Q' no se puede determinar en la ausencia de la medición de la radiación global.

Más recientemente, Page (1964) y otros, modificaron este método de Angström, para basarse en la radiación extraterrestre.

$$Q = Q_0 (a + b n/N) \quad (2)$$

donde: Q_0 , representa la radiación por unidad de área incidente sobre un plano horizontal fuera de la atmósfera y donde los otros símbolos tienen el mismo significado de antes. Q_0 , se puede determinar en forma no ambigua para un valor particular de la constante solar (ver Duffie y Beckman, 1974). La duración del día o en número de horas de sol posibles, N , se obtuvo de la fórmula propuesta por Cooper (1969).

$$N = 2 \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \quad (3)$$

donde δ es la declinación del sol y ϕ es la latitud del lugar.

Fórmulas del tipo Angström son de gran utilidad en los estudios climáticos de la distribución geográfica de la radiación global. Información dada por esta descripción climática es de gran interés cualitativo en la aplicación de la energía solar.

La ecuación de regresión fue elaborada por el método de los mínimos cuadrados, como una regresión entre Q / Q_0 y n/N .

3. APLICACION EN COSTA RICA

Con el objeto de aclarar el problema es que hemos tratado de hallar una relación entre los factores a y b y el porcentaje de insolación, usando cuidadosamente las medidas de radiación global y de brillo solar en Costa Rica.

La lista de las ecuaciones analizadas con la ecuación de regresión "tipo Angström" y los resultados obtenidos se ilustran en la tabla 1.

TABLA I.

Valores de a y b en la ecuación de regresión $Q/Q_0 = a + b n/N$ y el coeficiente de correlación, r , con base en valores diarios medios mensuales de la heliofanía relativa (n/N).

| Estación | Altura (m) sobre el nivel del mar | período | r | valor de a. | valor de b. | a + b | rango n/N | Valores medios anuales n/N | Q/Q_0 |
|---------------|--|-----------|------|----------------|----------------|-------|----------------|---------------------------------------|---------|
| Volcán Irazú | 3.400 | 1972-1973 | 0,95 | 0,30 | 0,54 | 0,84 | 0,13 - 0,80 | 0,42 | 0,53 |
| San José | 1.172 | 1972-1974 | 0,93 | 0,23 | 0,35 | 0,58 | 0,21 - 0,76 | 0,42 | 0,38 |
| Fabio Baudrit | 840 | 1970-1972 | 0,96 | 0,28 | 0,43 | 0,71 | 0,34 - 0,84 | 0,53 | 0,50 |
| Turrialba | 602 | 1965-1967 | 0,79 | 0,25 | 0,57 | 0,82 | 0,26 - 0,52 | 0,36 | 0,46 |
| Buenos Aires | 350 | 1972-1974 | 0,94 | 0,30 | 0,42 | 0,72 | 0,21 - 0,74 | 0,42 | 0,48 |
| Nicoya | 120 | 1971-1973 | 0,92 | 0,28 | 0,37 | 0,65 | 0,27 - 0,83 | 0,55 | 0,48 |
| Guácimo | 55 | 1973-1975 | 0,76 | 0,25 | 0,34 | 0,59 | 0,22 - 0,55 | 0,34 | 0,36 |
| Palmar Sur | 16 | 1978-1979 | 0,79 | 0,26 | 0,25 | 0,51 | 0,29 - 0,92 | 0,38 | 0,39 |
| Limón | 5 | 1970-1972 | 0,81 | 0,28 | 0,40 | 0,68 | 0,21 - 0,57 | 0,40 | 0,44 |
| Puntarenas | 3 | 1970-1972 | 0,78 | 0,28 | 0,40 | 0,68 | 0,38 - 0,84 | 0,57 | 0,51 |

Según la tabla 1 se deduce:

- a) para las estaciones costeras (Limón y Puntarenas) la relación entre n/N y Q/Q_0 , permanece uniforme siendo $a=0,28$ y $b=0,40$, en donde las características de transmisión atmosféricas sobre esas estaciones en cuestión son similares;
- b) la suma de los factores a y b , aumenta con la altitud, debido a que la longitud de la trayectoria seguida por los rayos solares en la atmósfera (masa atmosférica) es menor, por lo tanto, atenuación atmosférica es menor. San José (1.172m) y Turrialba (602m), son casos excepcionales. El primero, debido en gran parte a la alta contaminación atmosférica de la ciudad y obstrucciones del horizonte por la edificación, lo que atenúa parte de la radiación global, hace que la suma de los factores a y b disminuya (0,58). En Turrialba (0,82), según los datos de a y b , solamente el 18 % de la radiación solar se atenúa por la atmósfera. Al compararlo con el Volcán Irazú, que es la estación meteorológica más alta del país y en donde su horizonte no está rodeado por montañas como Turrialba, lo que permite una mejor insolación, se atenúa por la atmósfera el 16 % de la radiación global. Por lo tanto, supongo que en la estación meteorológica de Turrialba debe existir algún tipo de error sistemático, que desconozco, en las observaciones de los datos de insolación;
- c) analizando las estaciones que siguen una secuencia lógica respecto a la variación de $a+b$ con la altura, se observa en las estaciones que están prácticamente sobre el nivel del mar, como Limón (0,68), Puntarenas (0,68) y Nicoya (0,65), que $a+b$ son parecidos, lo que indica características de transmisividad atmosférica similares para cielo despejado, como se esperaba; estos valores, son similares a los citados en la literatura para estaciones al nivel del mar en zonas tropicales. Si se comparan aquellos valores, con las de las estaciones de Palmar Sur (0,51) y Guácimo (0,59), éstos son más pequeños, a pesar de estar prácticamente a la misma altura; basado en el análisis anterior se puede atribuir estas anomalías o casos excepcionales, a posibles errores sistemáticos en las observaciones de los datos de radiación que desconozco;
- d) los valores de $a+b$ en Buenos Aires (0,72) y Fabio Baudrit (0,71) estaciones a mayor altura, son mayores que Limón (0,68), Puntarenas (0,68) y Nicoya (0,65) respectivamente, que están prácticamente sobre el nivel del mar;
- e) se observa que $a+b$ es mayor para el Volcán Irazú (0,84), que es la estación meteorológica más alta del país, lo que indica mayor transmisividad atmosférica, como era de esperar; y
- f) en un último grupo de las estaciones analizadas, están aquellas que aparentemente presentan probables errores sistemáticos en las observaciones de radiación. En este grupo están: Guácimo, Turrialba, Palmar Sur y San José. Los valores de $a+b$ en la ciudad de San José podrían deberse a la considerable contaminación atmosférica de la ciudad y a la obstrucción del horizonte por los edificios que rodean la estación.

COEFICIENTES a Y b DE LA ECUACION DE ANGSTRÖM
MODIFICADA EN FUNCIÓN DE LA ALTURA

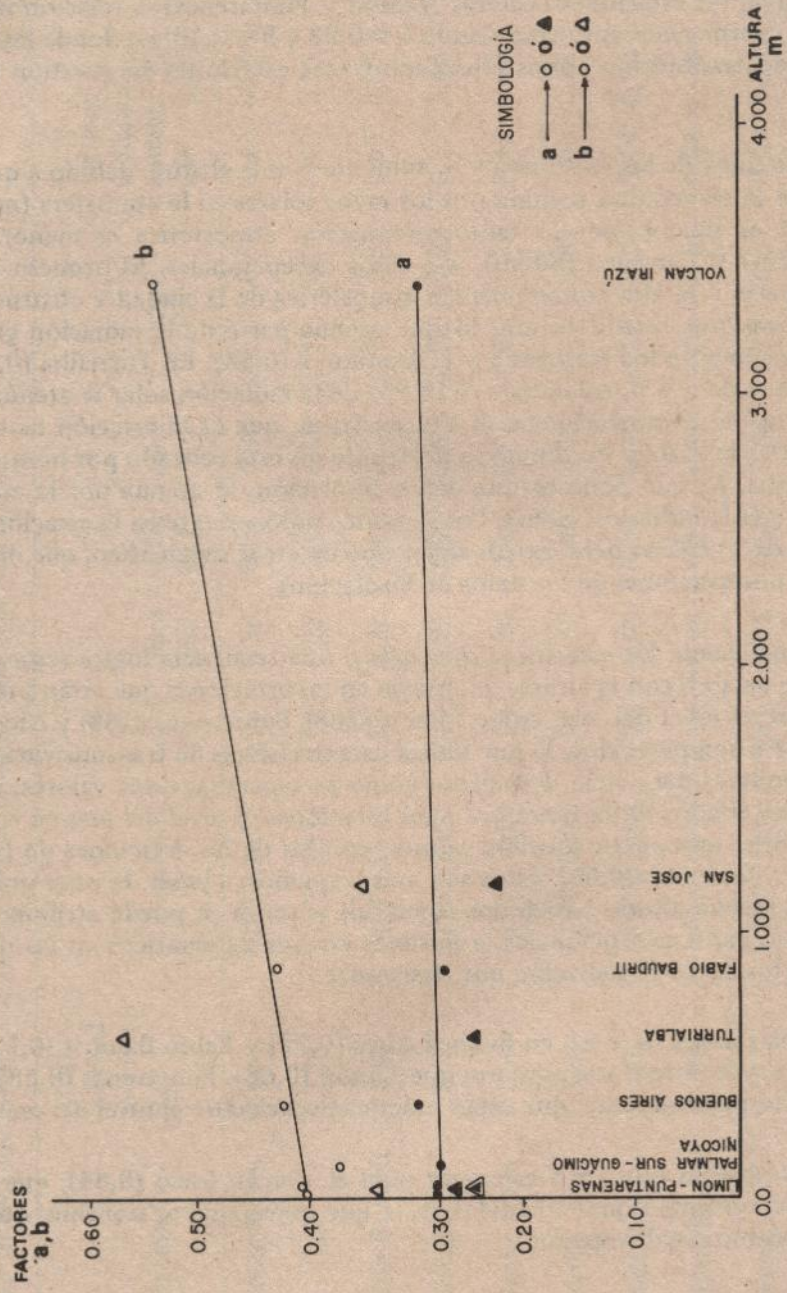


Fig 1

D/Gonzalo Hernández R. (81)

Al observar la variación de los coeficientes a, b con la altura en la figura 1. Se observa que, a y b aumentan con la altura, lo que implica que la transmisividad atmosférica aumenta con la altura. Se observa en este gráfico que las estaciones que se han indicado con un triángulo, (Turrialba, Guácimo, Palmar Sur y San José) se ha supuesto que tienen errores de observación, caen significativamente fuera de la recta propuesta para (a+b), versus altura. Es probable que esta relación no sea lineal, pero la falta de observaciones de radiación entre los mil y tres mil metros no permiten determinarla.

B. Fórmulas en función de las horas sol con dos o más constantes

Masson (1966) graficó la radiación global en un plano horizontal en cal. cm⁻². día⁻¹, Q, contra las horas de sol por día, n, y tuvo como resultado un segmento hiperbólico. El segmento tiende a una línea recta si el brillo solar es mayor o igual que siete horas.

$$Q = 60 + (1406,2 n^2 + 7426.6n)^{1/2} \quad (4)$$

Sabbagh y colaboradores (1973) utilizaron el brillo solar medio diario mensual, n, con una curva similar a la curva de radiación y dos constantes arbitrarias.

$$Q = (A + B \ln m) n$$

Donde A = 42, B = 12, m = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 6, 5, 4, 3, 2, 1, para los meses 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 respectivamente (mes 1 = enero, y así sucesivamente). Obviamente, en las latitudes tropicales, en que la curva de la radiación es bimodal habrá que usar valores de m distintos. (5)

C. Fórmulas en función de las horas de sol con un parámetro adicional

Swartman y Ogunlade (1966), utilizaron la humedad relativa, HR, y las horas de sol en tres ecuaciones diferentes

$$Q = 490 (n/12)^{0,357} (HR)^{-0,262} \quad (6)$$

$$Q = 460 \exp 0,607 (n/12 - HR) \quad (7)$$

$$Q = 464 - 265 (n/12) - 248 HR \quad (8)$$

D. Fórmulas en función de cuatro o más parámetros meteorológicos

Reddy (1971), propuso su fórmula compleja, la cual estima la radiación global media diaria mensual en la superficie terrestre en cal. cm⁻². día⁻¹

$$Q = K (1 + 0,8 n/N) (1 - 0,2 p' / n') / HR \quad (9)$$

donde: K, es un factor que depende de la latitud y altitud así como de la proximidad al mar; n/N, es la heliofanía relativa; HR, es la humedad relativa media

TABLA 2.

Desviación cuadrática media de cada fórmula utilizada en la estimación de la radiación global en Costa Rica.

| Estación | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
|---------------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|
| Limón | 57,1 | 108,0 | 28,7 | 37,6 | 78,9 | 23,6 | 134,0 | 14,7 |
| Volcán Irazú | 113,3 | 171,0 | 73,2 | 84,6 | 134,3 | 39,7 | 107,5 | 14,2 |
| Buenos Aires | 74,7 | 125,7 | 32,8 | 49,7 | 96,4 | 39,4 | 127,1 | 10,3 |
| Guácimo | 23,8 | 78,5 | 45,3 | 35,7 | 33,2 | 50,3 | 186,6 | 7,5 |
| Fabio Baudrit | 51,1 | 84,2 | 24,3 | 35,4 | 77,2 | 36,4 | 120,0 | 7,4 |
| Nicoya | 41,5 | 56,9 | 33,8 | 30,8 | 55,6 | 78,2 | 116,1 | 10,2 |
| Puntarenas | 48,0 | 66,0 | 33,7 | 45,5 | 85,0 | 40,7 | 97,7 | 20,8 |
| San José | 38,3 | 61,3 | 59,6 | 45,6 | 29,1 | 74,1 | 180,5 | 11,3 |
| Turrialba | 97,1 | 155,0 | 44,2 | 60,5 | 55,3 | 52,4 | 120,5 | 24,2 |
| Palmar Sur | 72,7 | 43,3 | 70,9 | 52,7 | 31,3 | 84,5 | 196,0 | 16,0 |
| Media | 61,8 | 95,0 | 44,7 | 47,8 | 67,6 | 47,4 | 134,6 | 13,7 |

mensual (expresada de 0 a 1); n' , número de días del mes; p' , número de días con lluvia en el mes; K , $(\lambda N + \psi_{ij} \cos \phi) 10^2$ cal/cm. día⁻¹; ϕ =latitud del lugar. N = duración media del día durante el mes, definida previamente. $\lambda 0,2/(1+0,1)$; ψ_{ij} = factor estacional ($i=1, 2, 3$, para estaciones tierra adentro, costeras y montañosas respectivamente, mientras $j=1, 2, 3, \dots, 12$ para los meses de enero a diciembre)(ver Reedy, 1971).

Sabbagh y colaboradores (1975), propusieron una fórmula general para estimar la radiación global en una superficie horizontal de la forma.

$$Q = 1,53 k. \exp \left[\phi \left(\frac{n}{12} - \frac{HR^{1/3}}{100} - \frac{1}{T_{\max}} \right) \right] \quad (10)$$

donde, T_{\max} : temperatura máxima del día durante el mes, y los factores ϕ , K y n fueron definidos anteriormente.

Todas estas fórmulas serán probadas con los valores medios mensuales en las estaciones meteorológicas situadas en el Volcán Irazú, San José, Limón, Nicoya, Buenos Aires, Turrialba, Guácimo, Puntarenas, Palmar Sur y Fabio Baudrit, donde se toma el valor observado de la radiación global como el correcto. Se acepta un aproximación de $\pm 10\%$ como aceptable, al utilizar datos meteorológicos y de brillo solar para obtener empíricamente la radiación global.

Resumen de fórmulas aplicadas en la estimación de la radiación global en Costa Rica

- | | | |
|------|--|------|
| I | $Q = 60 + (1406.2 n^2 + 7426.6n)^{1/2}$ | (4) |
| II | $Q = (A + B \ln m)n$ | (5) |
| III | $Q = 490 (n/12)^{0.357} (HR)^{-0.262}$ | (6) |
| IV | $Q = 460 \exp 0.607 (n/12 - HR)$ | (7) |
| V | $Q = 464 + 265 (n/12) - 248 HR$ | (8) |
| VI | $Q = K (1 + 0.8 n/N) (1 - 0.2 p' / n') HR$ | (9) |
| VII | $Q = 1.53 K \exp \phi \left(\frac{n}{12} - \frac{HR^{1/3}}{100} - \frac{1}{T_{\max}} \right)$ | (10) |
| VIII | $Q = Q_0 (a + b n/N)$ | (2) |

CONCLUSIONES

- Según el resultado del análisis estadístico dado en la tabla 2, donde se obtiene la desviación cuadrática de cada fórmula utilizada en la predicción de la radiación global en Costa Rica, la fórmula de Angström (ec 2) modificada posteriormente por Page emerge como el mejor estimador de la radiación global en Costa Rica.
- De la comparación de los valores de la radiación obtenida con la fórmula de Angström, se recomienda revisar las estaciones Guácimo, Turrialba y Palmar Sur, pues, probablemente, contienen errores de medición o de procedimientos.
- La estación San José, ubicada en medio de la ciudad, de transmisividades

muy bajas. Estas podrían deberse a la considerable contaminación de la atmósfera u obstrucciones del horizonte por la edificación.

d) Las demás ecuaciones que pretenden una aplicabilidad universal, usando distintos parámetros meteorológicos, dan errores significativamente grandes en Costa Rica.

RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar las constantes climáticas a, b, del tipo de ecuación de regresión Angström, dados en la tabla 1, como el mejor método para estimar la radiación global en Costa Rica. Estas constantes, que varían con el clima del lugar, son parecidas en las regiones costeras y difieren abruptamente en las regiones montañosas, debido a condiciones de transmisividad atmosférica.

Se recomienda para futuros trabajos una aplicabilidad de la ecuación de Angström, con base en la altura de cada estación, seleccionando las constantes a, b apropiadamente en aquellas estaciones que dispongan de observaciones de nubosidad.

BIBLIOGRAFIA

ANGSTROM, A.K. (1924). *Solar and atmospheric radiation*. Q.J.R. Meteorol. Soc. 50. 121.

COOPER, P.I. (1969). *The absorption of solar radiation in solar stills*. Solar Energy. 12. 3.

DUFFIE, J.A. and BECKMAN, W.A. (1974). *Solar Energy Thermal Processes*. P. 21. Wiley. New York.

MASSON, H. (1966). *Quantitative estimation of solar radiation*. Solar Energy. 10. 3.

PAGE, J.K. (1964). *Estimation of Monthly mean values of daily total short wave radiation or vertical and inclined surfaces from sunshine for latitude 40 N-40 S*. Proc. U.N. Conf. New Sources Energy 4. 378.

REDDY, S.J. (1971). *An empirical method for the estimation of total solar radiation*. Solar Energy. 13. 289.

SABBAGH, J.A., SAYIGH, A. A. M., and EL SALAM, E.M.A. (1973). *Correlation of solar radiation and sunshine duration in Riyadh, Saudia, Arabia, Pakistan* J. Sci. Ind. Res. 16. 6.

_____. *Estimation of the total solar radiation from meteorological data*. ISES. Conf. Los Angeles.

SWARTMAN, R.K. and OGUNLADE, O. (1966). *Solar radiation estimates from common parameters*. Solar Energy. Conf. Tempe, Arizona.
