

Comparación de métodos de estimación de la radiación solar en Maracay, Venezuela

Comparison of methods to estimate the solar radiation in Maracay, Venezuela

Vannessa G. Ayllón C.¹

¹Ingeniero Agrónomo. Tesis de Pregrado. Universidad Central de Venezuela (UCV). Facultad de Agronomía. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela. Correo electrónico: vannessa.ayllon@gmail.com

RESUMEN

La radiación solar global es el parámetro de entrada para numerosas aplicaciones de índole agronómico, sin embargo, los datos están poco disponibles para el usuario, por esto, surge la necesidad de utilizar métodos empíricos para estimarla que manejen variables de fácil consecución disponibles en todas las estaciones. Utilizando datos diarios de la Estación Meteorológica del CENIAP-Maracay, serial 2604, perteneciente a la red agrometeorológica del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, estado Aragua, Venezuela, se realizó un estudio comparativo en cinco métodos de estimación: Angstrom-Prescott (1940); Glover y McCulloch (1958); Bristow y Campbell (1984); Hargreaves *et al.* (1985); De Jong y Stewart (1993), con la finalidad de seleccionar el que estime mejor la radiación solar global para la zona en estudio. Las comparaciones se ejecutaron a través de la prueba estadística de prueba *ji* cuadrado, encontrándose que, todos los métodos están en concordancia con los valores de radiación medidos en esta estación. Sin embargo, el método que presentó la menor sobreestimación, fue De Jong y Stewart.

Palabras clave: radiación solar global, Angstrom-Prescott, Glover y McCulloch, Bristow y Campbell, Hargreaves, De Jong y Stewart.

ABSTRACT

The solar radiation is the input parameter for numerous applications, however, hardly available to the user, this arises the need to use empirical methods to estimate it which use easy achievement variables available in all meteorological stations. Using daily data from the meteorological station of Ceniap Maracay serial 2604, belonging to the agrometeorological network of INIA in Maracay, Venezuela, a study was conducted to compare 5 estimation methods: Angstrom-Prescott (1940), Glover and McCulloch (1958), Bristow and Campbell (1984), Hargreaves *et al.* (1985) and De Jong and Stewart (1993); in order to select which of these it considers better estimator of solar radiation for the study area. Comparisons have been implemented through the statistical test chi square, finding that, statistically, all methods are consistent with the values of radiation measured for this station. However, the method presented by the minor overestimation, was found to be De Jong and Stewart.

Key words: global solar radiation, Angstrom-Prescott, Glover and McCulloch, Bristow and Campbell, Hargreaves *et al.*, De Jong and Stewart.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la radiación solar global es esencial para muchas aplicaciones, tales como el uso de la energía solar como fuente alterna, modelos de simulación de crecimiento de los cultivos, en la arquitectura en el diseño de sistemas, estimación de la evapotranspiración, entre otras. Sin embargo, la disponibilidad de datos de radiación solar global es escasa, haciendo que el uso de técnicas numéricas sea una alternativa esencial. Con tales técnicas indirectas, otros datos meteorológicos son matemáticamente explorados con el fin de estimar la cantidad de radiación solar global que llega a la tierra (Tymvios *et al.*, 2004).

Aunque se han desarrollado varios modelos empíricos para la estimación de la radiación global, por regla general, los datos que se requieren para su aplicación son básicamente los mismos. Los parámetros meteorológicos que normalmente se utilizan, son: la humedad relativa, la temperatura, la altitud, la nubosidad, así como la insolación relativa.

Los modelos que más aceptación han tenido son aquellos que consideran únicamente la insolación relativa o bien la cantidad de nubes, ya que, son simples expresiones de regresión del proceso real de transferencia de radiación en la atmósfera (Estrada y Almanza, 2005).

En este estudio se estimó la radiación global a través de diferentes metodologías que emplean otras variables climáticas medidas comúnmente

en las estaciones climatológicas, con el objeto de comparar los datos estimados de radiación global con los medidos, y así determinar cuál de los métodos es el que mejor la estima para la zona en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se utilizó una serie de datos climatológicos comprendidos desde el año 1971 hasta 2010 de la estación del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP) Maracay serial 2604, perteneciente a la red agrometeorológica del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), ubicada en Maracay, estado Aragua, latitud: 10° 17' N, longitud: 67° 37' W, altitud: 455 m s. n. m.

Para realizar el procesamiento de datos, estos se organizaron en forma diaria tal como se muestra en el Cuadro 1.

Posteriormente se evaluó la calidad de los datos a través de la siguiente metodología:

Datos Faltantes: se eliminaron aquellos años en los que existan más de 10 datos diarios faltantes para cualquier elemento del clima, siguiendo los lineamientos establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (López, 2009).

Detección de datos atípicos: para radiación global, se comparó cada serie con los datos correspondientes de radiación extraterrestre, teniendo en cuenta que debe encontrarse entre el 10% y 85% (Atlas de Radiación Solar, 2002).

Cuadro 1. Disposición de los elementos climáticos para el mes de enero.

Año	Día	Precipitación (mm)	Radiación (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Insolación (h)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)
1971	1	0	16,8269	6,0	30,2	17,0
1971	31	0	18,2082	8,9	31,8	14,8
2010	1	0	18,5012	3,7	33,6	19,6
2010	31	0	21,4732	8,7	33,8	14,6

Según Castro (2008) el rango propuesto para las observaciones de temperatura del aire es de 5 a 40 °C para zonas bajas tropicales. En el caso del porcentaje de humedad relativa, considerando los valores promedios mensuales para la zona a estudiar, se consideran valores atípicos aquellos que sean menores a 30%. Para insolación se consideran valores atípicos aquellos que sean mayores a la duración del día astronómico (N)².

Homogeneidad de las series climatológicas

Para verificar la homogeneidad de las series climatológicas se utilizó la prueba de rachas, según lo propone Pérez *et al.* (2005), se corrió la prueba a través del programa estadístico Statistix versión 8.0 con un nivel de significación del 5%, se emplearon los promedios mensuales, ya que podría existir cierta dependencia o relación en los valores diarios de las variables en estudio³.

Para la estimación de la radiación se utilizaron cinco métodos:

Método Angstrom-Prescott (1940)

$$\frac{R_s}{R_a} = \left[a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right]$$

Donde: R_s : radiación global (MJ m⁻² día⁻¹); R_a : radiación extraterrestre (MJ m⁻² día⁻¹); n : insolación (h); N : duración máxima posible de la insolación (h); n/N : duración relativa de la insolación (adimensional); a y b : coeficientes empíricos que se pueden estimar para una zona en particular.

Se fijaron los valores de los coeficientes a y b como 0,2 y 0,5, respectivamente, tal como lo recomiendan Pérez *et al.* (2005) cuando no se dispone de datos de R_s y R_a .

La radiación extraterrestre se calculó de la siguiente manera (Allen *et al.*, 1998):

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

Donde: R_a : radiación extraterrestre (MJ m⁻² día⁻¹); G_{sc} : constante solar = 0,0820 (MJ m⁻² día⁻¹); d_r : inverso de la distancia relativa entre la Tierra y el Sol; ω_s : ángulo de la puesta de sol (radianes); φ : latitud (radianes); δ : declinación solar (radianes).

El inverso de la distancia relativa entre la Tierra y el Sol (d_r), y la declinación (δ) están dados por las siguientes ecuaciones:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad \delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J\right) - 1,39$$

Donde J es el número del día del año (1 a 365)

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol, ω_s , viene dado por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

Método de Glover y McCulloch (1958)

$$\frac{R_s}{R_a} = 0,29 \cos(\text{lat}) + 0,55 (n/N)$$

Donde R_s , R_a , n , N , n/N , lat. , son similares a los indicados previamente. Lat. es la latitud radianes. El método es válido para latitudes de 0 a 60°.

Método de Bristow y Campbell (1984)

$$\frac{R_s}{R_a} = A(1 - \exp[-B D^C])$$

Donde R_s y R_a , son similares a lo indicado previamente, mientras que A , B y C son coeficientes empíricos que se pueden estimar para un sitio en particular a partir de datos medidos de radiación solar y D : rango diurno de la temperatura del aire, se calcula:

$$D = T_{\text{máx}} - \frac{T_{\text{mín}}(j) + T_{\text{mín}}(j+1)}{2}$$

Donde: $T_{\text{máx}}$: temperatura máxima diaria (°C); $T_{\text{mín}}(j)$: temperatura mínima en un día (°C); $T_{\text{mín}}(j+1)$: temperatura mínima diaria al día siguiente.

²Ingeniera Agrónomo María José Méndez, comunicación personal - marise.mendez@gmail.com

³Ingeniera Agrónomo Genady Bracho, comunicación personal - gennadybm@gmail.com

Para el presente estudio se establecieron los coeficientes de acuerdo con las directrices utilizadas por dichos autores, donde A y C se mantuvieron constantes con valores de 0,7 y 2,4, respectivamente y B variable con el objeto de estudiar la estacionalidad de los datos. El valor de B está directamente relacionado con la amplitud térmica diaria (ΔT) y se calcula de la siguiente manera:

$$B = 0,036 \exp(-0,154 \Delta T)$$

Donde:

$$\Delta T = T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}$$

Método de Hargreaves *et al.* (1985)

$$\frac{R_s}{R_a} = KT \sqrt{\Delta T}$$

Donde: KT : coeficiente de calibración que puede ser estimado para una zona en particular; ΔT : diferencia entre $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ diarias.

El coeficiente de calibración (KT) que se utilizó es de 0,134, según señala López (2009).

Método de De Jong y Stewart (1993)

$$R_s = R_a[a(\Delta T)^b (1 + cP + dP^2)]$$

Donde R_s , R_a , ΔT son similares a lo indicado anteriormente y a , b , c , d son coeficientes empíricos que varían según la época del año.

Los coeficientes se estimaron a través de ajustes no lineales, por medio del programa estadístico JMP™ versión 6.0, luego para verificar la bondad del ajuste y siguiendo lo propuesto por los autores, se realizó el análisis de regresión para la variable Y (R_s estimada/ R_a) y la variable X (R_s medida/ R_a) obteniéndose los valores de los coeficientes de determinación (R^2) y errores cuadráticos medios (RMSE) para cada mes.

Por último, se realizó la prueba de ji cuadrado para comparar las estimaciones de cada método (E) con los valores reales de radiación solar global (O). El estadístico de prueba se basa en las diferencias entre los O_i y E_i y se define como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto al análisis de calidad de los datos, después de la eliminación de datos atípicos se cumplió con la longitud adecuada de las series (30 años) para asegurar la confiabilidad de los resultados (Pérez *et al.*, 2005).

La no uniformidad se presentó en la precipitación para el mes de marzo, la radiación global para los meses enero, febrero, marzo, abril, mayo y diciembre; y por último la temperatura mínima en el mes de octubre. Para el resto de los elementos climáticos en estudio si se obtuvo homogeneidad.

Según Pérez *et al.* (2005), los valores de probabilidad por debajo del nivel de significación indican que los términos de la serie tienen una alta dependencia positiva y por lo tanto, se sospecha que la misma tiene una tendencia a aumentar o disminuir.

Referente a las estimaciones de los coeficientes del modelo de De Jong y Stewart (1993), el Cuadro 2 muestra los valores obtenidos y los estadísticos calculados.

Los bajos valores del coeficiente de determinación (R^2) indican una deficiencia en el modelo, sin embargo, al observar los valores de los cuadrados medios del error (RMSE), resultaron de baja magnitud, lo que indicaría poca discrepancia entre los valores observados y los medidos.

Es importante destacar que decidir la bondad del modelo solamente basado en el valor de R^2 podría llegar a establecer conclusiones erradas.

Comparación de las estimaciones

Según lo observado en la Figura 1, las estimaciones hechas por el método de De Jong y Stewart (1993) son las más precisas, exceptuando en el mes de julio, mientras que para el resto de los métodos se observa que Bristow y Campbell (1984) y Glover y McCulloch (1958) sobreestiman la radiación global, en cambio que Angstrom-PreScott (1940) y Hargreaves *et al.* (1985) tienden a subestimar la radiación.

Cuadro 2. Coeficientes mensuales y estadísticos para el modelo de De Jong y Stewart.

Mes	a	b	c	d	R ²	RMSE
Enero	0,544	0,013	-0,032	0,00172	0,008	0,104
Febrero	0,287	0,244	-0,068	0,00335	0,087	0,106
Marzo	0,209	0,352	-0,043	0,00137	0,177	0,098
Abril	0,140	0,483	-0,008	0,00010	0,316	0,105
Mayo	0,165	0,425	-0,005	0,00005	0,233	0,107
Junio	0,230	0,313	-0,006	0,00005	0,161	0,108
Julio	0,251	0,284	-0,006	0,00005	0,135	0,104
Agosto	0,213	0,346	-0,006	0,00007	0,148	0,488
Septiembre	0,302	0,216	-0,005	0,00008	0,062	0,114
Octubre	0,300	0,210	-0,005	0,00005	0,064	0,107
Noviembre	0,386	0,118	-0,008	0,00020	0,029	0,113
Diciembre	0,361	0,153	-0,022	0,00051	0,047	0,105

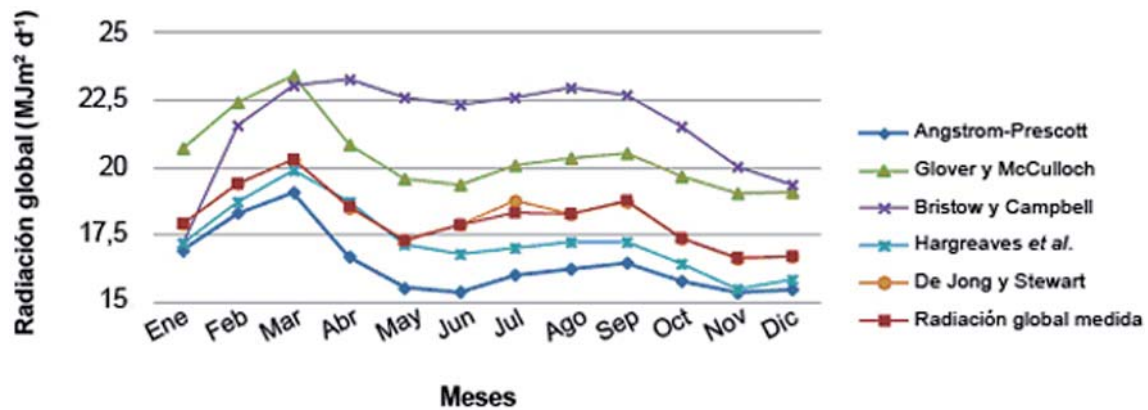


Figura 1. Radiación global medida vs. estimada.

Este resultado podría deberse al efecto de solapamiento causado por las medias mensuales, para verificar dicho efecto, se compararon las estimaciones diarias usando el año 1987, por ser el único año en el que no existen datos faltantes para los 365 días. En contraste, se presentan en las Figuras 2 y 3 las estimaciones diarias del mes de enero (mes seco) con las del mes de agosto (mes húmedo), respectivamente.

Como se observa, durante el año 1987 los valores estimados por el método de Angstrom-Prescott (1940) resultaron más precisos en los meses secos, inclusive en aquellos casos donde existen valores bajos de radiación, no obstante, el método requiere datos medidos de radiación global para estimar los coeficientes “a” y “b” de la zona en particular. Por otra parte, el método de Glover y McCulloch (1958), sobreestima la

radiación tanto en estimaciones diarias como en las mensuales, en contraste con el método de Angstrom-Prescott (1940) y Hargreaves *et al.* (1985) no son necesarios datos de radiación global para la estimación y su principal desventaja es que solamente es válido para latitudes entre 0 y 60°.

Tanto en el método Angstrom-Prescott (1940) como el de Glover y McCulloch (1958) son necesarios datos de insolación, que solamente se miden en estaciones tipo C1, lo que implica

una desventaja con respecto a los otros métodos que requieren de datos medidos en estaciones más sencillas. En el caso del método de Bristow y Campbell (1984) su principal debilidad se debe a que, son asumidos los valores de los coeficientes A y C del estudio original, por lo que no se tienen valores característicos de la zona en estudio, generando errores en las estimaciones. El método de Hargreaves *et al.* (1985) requiere de datos medidos de radiación solar global para estimar el coeficiente KT de la zona en particular.

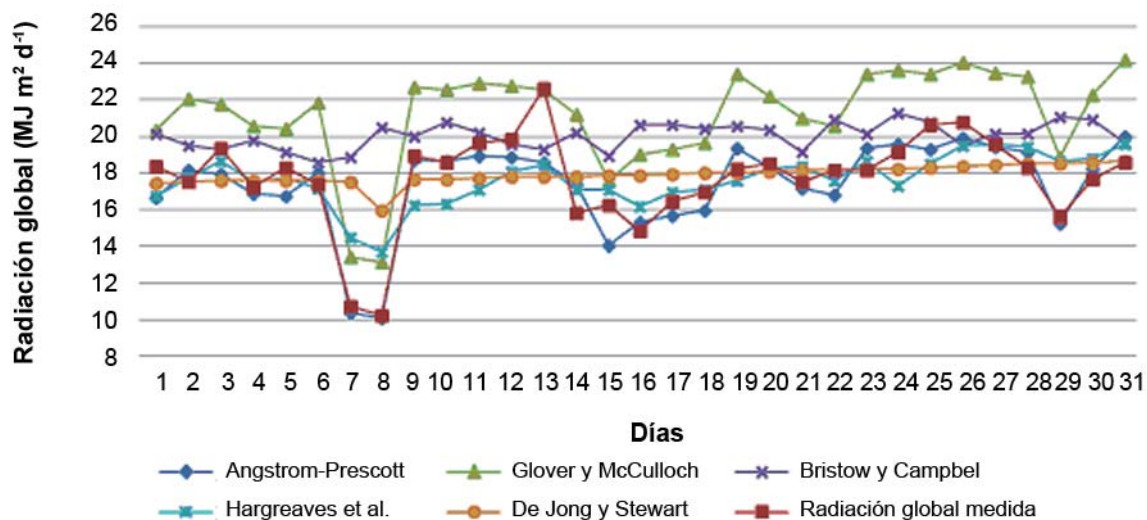


Figura 2. Radiación global medida vs. estimada para el mes de enero.

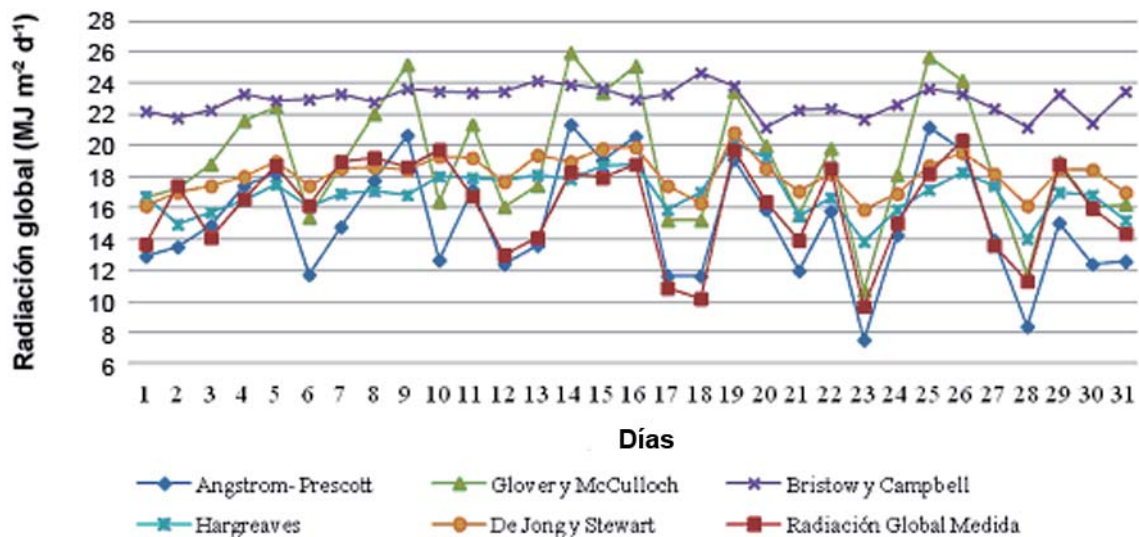


Figura 3. Radiación global medida vs. estimada para el mes de agosto.

En comparación con los resultados obtenidos en la Figura 1, donde el mejor estimador es el modelo de De Jong y Stewart (1993), se observa que en los datos diarios esto se debe más a la uniformidad de las estimaciones, que a la precisión de las mismas, puesto que los valores estimados diarios por encima y por debajo de los medidos, se compensan al calcular los promedios mensuales.

Según se observa en el Cuadro 3, los resultados obtenidos en la prueba de *ji* cuadrado, para todos los métodos de estimación los valores estimados están en concordancia con los valores medidos, sin embargo existen diferencias entre los valores de *ji* cuadrado para los distintos métodos. El método de Bristow y Campbell (1984) fue el que peor estimó la radiación global en cuanto

la sobreestimó para todos los casos como se mencionó anteriormente, contrario a esto, se tiene que el método de De Jong y Stewart (1993) es el que mejor estimó la radiación, obteniéndose el valor mínimo de *ji* cuadrado para el mes de enero y el máximo en el mes de mayo.

Considerando los resultados obtenidos del análisis de regresión, donde los valores de los coeficientes de determinación mensuales son relativamente bajos al igual que los cuadrados medios del error, el modelo de De Jong y Stewart (1993) es superior a los otros por la calidad de las estimaciones. La principal desventaja es que la obtención de los coeficientes se realiza a través de metodologías que pueden resultar complejas en usuarios que no estén familiarizados con modelos no lineales.

Cuadro 3. Valores de *ji*-Cuadrado para cada método.

	Angstrom- Prescott	Glover y McCulloch	Bristow y Campbell	Hargreaves <i>et al.</i>	De Jong y Stewart
Enero	0,71	0,86	0,85	0,85	0,63
Febrero	0,68	0,87	0,94	0,81	0,69
Marzo	0,81	0,95	1,06	0,73	0,66
Abril	1,36	1,02	2,64	0,94	0,94
Mayo	1,18	0,90	2,37	1,07	1,02
Junio	1,60	0,91	3,79	1,13	0,92
Julio	1,34	0,83	1,65	1,11	0,84
Agosto	1,25	0,90	1,78	1,08	0,91
Septiembre	1,43	0,94	1,87	1,36	0,98
Octubre	1,10	0,92	1,56	1,02	0,82
Noviembre	1,10	1,01	1,32	1,12	0,82
Diciembre	0,96	0,91	0,99	0,83	0,64
Media	1,13	0,92	1,73	1,00	0,82

CONCLUSIONES

Evaluar la calidad de los datos resulta fundamental en cualquier análisis climatológico, puesto que de ello dependerá la bondad de los resultados.

El uso futuro de un método en particular, dependerá del alcance que se persiga, si se desea trabajar con datos mensuales, el método de De Jong y Stewart (1993) proporcionará la mejor herramienta para la estimación, mientras que si se trabajara con datos diarios, es recomendable el método de Angstrom-Prescott (1940). Por otra parte, se deberá evaluar si de acuerdo al propósito de la investigación conviene más un método que sobreestime o subestime la radiación solar global, porque de ello dependerá su impacto en otras variables.

Los coeficientes obtenidos en los distintos modelos, exceptuando el de Angstrom-Prescott son particulares de la zona en estudio, por lo que no es recomendable utilizarlos en regiones con características disímiles.

LITERATURA CITADA

- Allen, R., L. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO-56. Roma. 301 p.
- Atlas de Radiación Solar. 2002. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM. Unidad de planeación minero energética UPME. República de Colombia. Apéndice. D.
- Bristow, K. and G. Campbell. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* (EE. UU.).31(2):159-166.
- Castro, F. 2008. Organización para Estudios Tropicales. Manual de procedimientos para las estaciones meteorológicas. Departamentos Científicos de la Selva y Manejo de Información. Compilado por Enrique Castro. Revisado por: D. Brenes, W. López, O. Madrigal, B. Matarrita, J. Serrano y Z. Zahawi. Sarapiquí, Costa Rica.
- De Jong, R. and D. W. Stewart. 1993. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science* (Canadá). 73(2):509-518.
- Estrada, V. y R. Almanza. 2005. Irradiaciones global, directa y difusa en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 64 p.
- López J. 2009. Efecto y estimación de datos diarios faltantes de radiación global sobre la calidad de la serie mensual. Trabajo de grado Ingeniero Agrónomo. Maracay, Ven. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 57 p.
- Hargreaves, G. L., G. H. Hargreaves and J. Riley. 1985. Irrigation water requirement for the Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 111(3):265-75.
- Pérez, M., M. Puche y G. Bracho. 2005. Herramientas para el control de calidad de datos climáticos y su análisis con fines de uso agropecuarios. *Revista Digital CENIAP HOY*. Revista técnica de las ciencias del agro editada por el CENIAP del INIA. Sección Preimpresos.
- Prescott, J. 1940. Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 64(1):114-118.
- Tymvios, F. S., C. P. Jacovides, S. C. Michaelides and C. Scouteli. 2005. Comparative study of Angstrom's and Artificial Neural Networks methodologies in estimating global solar radiation. *Solar Energy* (Cyprus). 78(6):752-762.