

COEFICIENTES PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DEL BRILLO SOLAR EN LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA

Orlando Guzmán Martínez*, José Vicente Baldión Rincón*, Ovidio Simbaqueva Fonseca**,
Henry Josué Zapata***, César Chacón Cardona****

GUZMÁN M., O.; BALDIÓN R., J. V.; SIMBAQUEVA F., O.; ZAPATA, H. J.; CHACÓN C., C. Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. Revista Cenicafé 64(1): 60-76. 2013

Se estudió una nueva relación entre la radiación solar global medida en una superficie horizontal y el número de horas de sol en 17 estaciones meteorológicas localizadas a lo largo y ancho de la zona cafetera colombiana, para el período 1988- 2002. La información a nivel diario se registró en un actinógrafo marca Belfort y en un heliógrafo ecuatorial tipo Campbell-Stokes, instalados según las normas de la Organización Meteorológica Mundial. Se realizaron correlaciones lineales entre el índice de claridad promedio mensual diario (RG/RA) y el brillo solar relativo (n/N) con la ecuación obtenida por Angström-Prescott aplicada a cada una de las estaciones, a los grupos geográficos conformados y a un solo grupo compuesto por todas las estaciones. El desempeño de los modelos obtenidos se evaluó a través de las pruebas estadísticas denominadas el error de sesgo medio, la raíz cuadrada del error cuadrático medio, el porcentaje medio del error, la diferencia porcentual y el estadístico t . En general, los modelos mostraron resultados satisfactorios y se pueden utilizar para la estimación de la radiación solar global en sitios donde solo se cuenta con datos de horas de brillo solar.

Palabras clave: Colombia, horas de brillo solar, análisis de regresión.

GLOBAL SOLAR RADIATION COEFFICIENTS ESTIMATED FROM SOLAR SHINE IN THE COLOMBIAN COFFEE REGION

A new relationship between global solar radiation measured on a horizontal surface and sunshine duration was studied for 17 meteorological stations in the coffee growing zone of Colombia during the period 1998 – 2002. Daily information was taken through a Belfort pyranograph and a Campbell-Stokes heliograph following the recommendations of the World Meteorological Organization. Linear correlations were established between the monthly average daily clearness index (RG/RA) and the relative possible sunshine hours (n/N) to fit the Angström-Prescott equation for individual stations, geographical groups and the entire measured data of all the stations together. Estimated values were compared with measured values using the well known statistical tests such as the mean bias error, root mean square error, mean percentage error and the percentage difference in conjunction with the t-statistic. In general, all the models derived fitted the data adequately and can be used to estimate monthly mean daily global solar radiation in areas where only sunshine hours data are available.

Keywords: Colombia, bright sunshine hours, regression analysis.

* Investigador Científico III (hasta 2010). Disciplina de Agroclimatología, Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, Manizales, Caldas, Colombia.

** Investigador. Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, D.C., Colombia.

*** Investigador. Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, D.C., Colombia.

**** Docente Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. Bogotá, D.C., Colombia.

La importancia de la radiación solar ha sido reconocida desde la antigüedad y hoy en día ofrece un gran potencial en una variada gama de aplicaciones como fuente de energía renovable limpia. Después de la crisis energética de los años 1970, el continuo aumento de los precios de la energía y los efectos ambientales adversos como la contaminación del aire, la disminución de la capa de ozono y el efecto de invernadero el uso de la energía solar ha recibido un renovado impulso en las dos últimas décadas.

La radiación solar se utiliza en campos tales como la arquitectura y el planeamiento urbano, agricultura y horticultura (optimización de la productividad, modelos de simulación), iluminación natural, térmica solar (calefacción, ventilación, calentamiento de agua), tratamiento de aguas (desinfección y desalinización), generación de electricidad (celdas fotovoltaicas, concentradores solares), entre otros, los cuales pueden también contribuir en la mitigación de la problemática del cambio climático al disminuir la emisión de gases de efecto de invernadero.

Para poder hacer uso de la radiación solar se requiere de su medición a través del tiempo, con equipos confiables como los piranómetros. No obstante, debido a su costo y frecuente calibración son pocas las series de datos que se encuentran disponibles en los distintos países y, en general, se recurre a su estimación a través del brillo solar (número de horas de sol). Esta última variable se mide con un equipo denominado heliógrafo, cuyo manejo es sencillo, confiable y hace parte de las estaciones climáticas que se encuentran ampliamente distribuidas en el mundo.

Angström en 1924 (2) encontró una buena relación lineal entre la radiación solar global

y el brillo solar, y propuso una ecuación para el cálculo de la radiación. Posteriormente, Prescott (22) le introdujo una modificación y desde entonces ha sido utilizada con éxito en distintos lugares del mundo (1, 3, 4, 6, 7, 8, 15, 17, 20, 21, 23).

El objetivo de este estudio fue la aplicación de la ecuación modificada de Angström para establecer los coeficientes de regresión a y b, de diferentes lugares, con base en los registros radiométricos y heliométricos medidos, de manera que a partir de ellos se pueda estimar la radiación solar global en una superficie horizontal, en cualquier sitio de la zona cafetera colombiana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Instrumental e información. La información de radiación solar global y brillo solar para el período 1998-2002 se registró en 17 estaciones climatológicas principales, ubicadas en predios de estaciones experimentales del Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, que hacen parte del Servicio Meteorológico de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC (9). Su localización en la geografía cafetera y sus registros mensuales se presentan en las Tablas 1 y 2.

La radiación solar global se midió en actinógrafos de registro diario tipo Belfort, cuyo sensor está constituido por dos láminas idénticas de metal, una pintada de negro y la otra altamente reflectiva, que captan la radiación en el rango de 360 – 2.000 nm (5).

Este instrumental se calibró cada 3 años con el patrón nacional del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y sus gráficas se evaluaron mediante un planímetro y el programa Autocad versión 2000, con errores

Tabla 1. Localización de las estaciones climáticas de estudio en la zona cafetera colombiana.

Estación	Municipio	Departamento	Latitud N		Longitud W		Altitud
			Grados	Minutos	Grados	Minutos	m
			10	25	73	34	1.134
San Antonio	Floridablanca	Santander	7	06	73	04	1.539
El Rosario	Venecia	Antioquia	5	58	75	42	1.635
Rafael Escobar	Supía	Caldas	5	27	75	38	1.307
Santa Helena	Marquetalia	Caldas	5	19	75	00	1.395
Santa Bárbara	Sasaima	Cundinamarca	4	56	74	25	1.478
La Trinidad	Libano	Tolima	4	54	75	02	1.456
Albán	El Cairo	Valle del Cauca	4	47	76	11	1.510
La Catalina	Pereira	Risaralda	4	45	75	44	1.321
Maracay	Quimbaya	Quindío	4	36	75	44	1.402
Paraguaicito	Buenavista	Quindío	4	24	75	44	1.203
La Sirena	Sevilla	Valle del Cauca	4	17	75	54	1.519
Manuel Mejía	El Tambo	Cauca	2	24	76	44	1.735
Jorge Villamil	Gigante	Huila	2	20	75	31	1.420
Ospina Pérez	Consacá	Nariño	1	15	77	29	1.603

por debajo del 5%, en el marco del trabajo Atlas de radiación solar de Colombia (13). El brillo solar se midió en un heliógrafo Campbell-Stokes tipo ecuatorial (18).

La exposición y altura del instrumental estuvo de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (28).

Análisis

Control de la calidad de los datos y generación de datos faltantes. Para la radiación solar global y el brillo solar se adelantaron los siguientes pasos:

- Al tener como control que en la superficie no llega más del 85% de la radiación solar extraterrestre (efectos de absorción, dispersión y reflexión en la atmósfera) y que el brillo solar no puede exceder el valor máximo teórico posible, se contrastaron estos valores con sus correspondientes datos medidos.
- Para las estaciones con datos faltantes, éstos

se estimaron para períodos no superiores a 10 días consecutivos. El faltante no podía pertenecer a una racha de días donde no se disponía de información. Se consideró como mínimo contar con 600 días consecutivos de datos.

- Se obtuvo un modelo de Angström grado 3, de la forma como se presenta en la Ecuación <1>:

$$\frac{RG}{RA} = m_1 \left(\frac{n}{N}\right) + m_2 \left(\frac{n}{N}\right)^2 + m_3 \left(\frac{n}{N}\right)^3 + b$$

Ecuación <1>

Donde:

RG = Radiación solar global diaria, medida en el lugar (lecturas del actinógrafo)

RA = Radiación solar global diaria recibida en el límite de la atmósfera

n = Número de horas de sol en el sitio (medidas del heliógrafo)

N = Máximo número de horas de brillo solar diarias astronómicamente posible

m1, m2, m3, b = Coeficientes específicos de la regresión múltiple.

Tabla 2. Valores medios mensuales de brillo solar (horas) y radiación solar global ($\text{MJ.m}^{-2}\text{-día}^{-1}$) en estaciones de la zona cafetera colombiana.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Pueblo Bello	8,5	7,6	6,7	5,7	5,2	5,8	6,6	6,2	5,3	5,5	6,6	6,9	6,4
	22,5	22,1	21,7	20,6	19,7	20,8	21,7	21,2	19,6	19,0	19,1	19,1	20,6
San Antonio	5,5	4,1	3,5	3,2	3,1	3,1	3,9	3,8	3,6	4,0	3,6	3,6	3,8
	14,8	13,6	13,7	13,2	12,9	13,1	13,7	13,7	13,7	14,0	12,6	12,0	13,4
El Rosario	6,4	5,0	5,1	4,5	4,9	5,8	6,6	6,5	4,6	4,4	4,5	4,2	5,2
	16,9	15,1	15,9	14,8	15,6	16,5	17,8	17,3	15,1	14,3	14,2	13,7	15,6
Rafael Escobar	6,4	5,0	4,7	5,0	4,7	5,3	6,2	6,6	4,9	5,1	4,8	4,9	5,3
	18,3	17,3	17,2	17,4	16,5	16,5	17,5	18,4	17,1	17,2	16,1	15,8	17,1
Santa Helena	4,3	2,9	2,8	3,1	4,2	4,2	6,0	6,3	4,4	4,1	3,6	3,0	4,1
	12,9	11,7	11,8	11,6	13,3	13,1	15,3	16,1	13,8	13,1	12,0	11,1	13,0
Santa Bárbara	4,4	3,3	2,9	3,1	3,4	3,7	4,6	4,6	3,6	4,1	3,8	3,3	3,7
	14,5	13,9	13,5	13,8	14,5	14,0	16,0	14,6	13,9	15,2	14,0	13,3	14,3
La Trinidad	3,7	3,4	3,4	3,3	3,7	4,3	5,5	6,3	4,3	4,4	3,3	3,2	4,1
	13,5	13,7	14,3	14,0	14,1	14,9	16,6	18,1	15,8	15,5	13,2	12,6	14,7
Albán	4,1	3,7	3,6	3,8	3,8	4,4	5,2	5,6	4,1	4,2	3,2	3,0	4,1
	13,4	13,4	14,7	15,2	14,9	15,5	16,7	16,7	15,0	14,4	12,7	12,2	14,6
La Catalina	5,5	4,4	4,1	3,6	3,5	4,0	5,1	5,5	3,8	4,4	4,0	4,3	4,3
	17,0	16,3	15,6	15,2	14,3	15,0	16,2	17,0	15,2	15,9	14,9	14,6	15,6
Maracay	5,1	4,1	4,0	3,6	3,6	3,9	5,2	5,9	3,8	4,4	3,6	3,7	4,2
	15,3	14,7	15,0	14,3	13,7	14,0	15,5	16,4	14,3	15,0	13,4	13,2	14,6
Paraguaicito	5,5	4,6	4,2	3,8	3,8	4,1	5,1	5,4	3,8	4,4	4,0	4,1	4,4
	16,8	16,2	16,4	15,9	14,5	14,9	16,1	16,4	15,6	15,8	14,6	14,0	15,6
La Sirena	4,0	3,4	3,0	3,0	3,0	3,5	4,5	5,2	3,5	3,7	3,1	3,6	3,6
	13,2	12,8	12,8	12,9	12,7	13,2	14,3	15,1	13,2	12,8	11,8	12,0	13,1
Manuel Mejía	5,1	4,7	4,2	3,9	4,0	3,5	5,4	6,3	4,2	4,6	3,6	4,4	4,5
	16,0	16,1	16,2	15,8	14,8	14,8	16,1	17,3	15,2	16,2	14,1	14,9	15,6
Jorge Villamil	4,2	3,3	2,7	2,8	2,6	3,0	2,8	3,3	3,4	3,5	3,2	3,3	3,2
	15,3	14,1	13,2	13,8	13,2	14,2	13,9	14,4	15,0	14,7	14,3	13,9	14,2
Ospina Pérez	4,4	3,9	3,5	3,7	3,7	4,4	5,2	6,1	4,6	5,1	4,3	4,4	4,4
	14,9	14,3	14,3	14,5	14,2	13,9	15,5	16,7	15,7	16,6	15,3	14,9	15,1

Posteriormente, se determinó el error estándar de la estimación, para depurar los datos diarios que presentaron una dispersión mayor al error estándar. Los datos faltantes y aquellos que se apartaron del valor estimado del error estándar, se reemplazaron por los valores obtenidos con la regresión polinómica.

Para finalizar se hizo otra depuración al promedio diario de la serie con una regresión lineal (modelo Angström de primer grado) con su correspondiente prueba de F al 0,01.

Estimación de los coeficientes de regresión a y b . Para la estimación de los coeficientes a y b se utilizó la ecuación modificada de

Angström de primer grado, que relaciona la radiación global solar con el brillo solar a través de la Ecuación <2>:

$$\frac{RG}{RA} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad \text{Ecuación <2>}$$

Donde:

RG es la radiación solar global medida en la estación; *RA* es la radiación solar global extraterrestre recibida en un plano horizontal para un día determinado sobre la localización deseada; *n* es el número de horas de brillo solar medido en la superficie; *N* es la duración del día obtenida a partir de consideraciones astronómicas; *a* y *b* son los coeficientes de regresión de un modelo lineal simple, entre *RG/RA* y *n/N*, determinados por mínimos cuadrados. *RA* y *N* se obtuvieron considerando la posición geográfica del lugar, la declinación solar, el ángulo horario para la salida del sol y la constante solar; éstas se derivaron de acuerdo con la metodología utilizada por Guzmán *et al.* (11).

Con las series de cada una de las estaciones se obtuvieron la radiación solar global y las horas de duración del sol medias diarias, con esta información se estableció la relación lineal entre el denominado índice de claridad *RG/RA* y la duración relativa posible del brillo solar *n/N*. En cada estación se determinó el intervalo para cada uno de los coeficientes de regresión, con un coeficiente de confianza del 95%, y se evaluó la posible agrupación de estaciones por igualdad estadística de los modelos, de acuerdo con la prueba F al 5%.

La bondad de los modelos obtenidos se examinó de acuerdo con las siguientes medidas estadísticas que son recomendadas en la comparación de ecuaciones que estiman la radiación solar global (1, 12, 14, 16, 26):

- El error de sesgo medio (*ESM*), que se refiere al error sistemático, sus valores

positivos indican una sobrestimación, los negativos una subestimación y se expresa mediante la Ecuación <3>:

$$M = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (RGe - RGm)}{n} \right] \quad \text{Ecuación <3>}$$

Donde:

ESM: Error de sesgo medio.

RGe: Radiación solar global estimada (MJ.m⁻²-día⁻¹)

RGm: Radiación solar global medida en la estación (MJ.m⁻²-día⁻¹)

n: Número de observaciones

El error porcentual medio (*EPM*), es una medida global de la precisión de la estimación y desviaciones de ± 10% son aceptables (12) (Ecuación <4>):

$$EPM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{RGm - RGe}{RGm} \right\} \cdot 100}{n} \right] \quad \text{Ecuación <4>}$$

Donde:

EPM: Error porcentual medio

RGe: Radiación solar global estimada (MJ.m⁻²-día⁻¹)

RGm: Radiación solar global medida en la estación (MJ.m⁻²-día⁻¹)

n: Número de observaciones.

Estos dos tipos de errores permiten visualizar si hay sobreestimación o subestimación de los datos y los valores bajos indican un buen ajuste del modelo.

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) muestra la variación de las estimaciones con respecto a los datos registrados, es siempre positivo y es deseable que esté cerca de cero, su expresión se presenta en la Ecuación <5>.

$$RECM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (RGe - RGm)^2}{n} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación <5>}$$

Donde:

RECM: Raíz cuadrada del error cuadrático medio

RGe: Radiación solar global estimada (MJ.m⁻²-día⁻¹)

RGm: Radiación solar global medida en la estación (MJ.m⁻²-día⁻¹)

n: Número de observaciones

El estadístico *t* permite la comparación objetiva de los modelos, establece la significancia estadística y entre más pequeño sea su valor, mejor es el desempeño de un modelo. Éste calculó mediante la Ecuación <6>:

$$t = \left[\frac{(n-1) \cdot ESM^2}{RECM^2 - ESM^2} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación <6>}$$

Los modelos obtenidos por grupos geográficos y el de todas las estaciones reunidas, así como los derivados en dos países tropicales como Ruanda (*RG/RA* = 0,242 + 0,641) (24) y Venezuela (*RG/RA* = 0,263 + 0,344) (1), y la ecuación estimada para Cenicafé (Manizales, Caldas) (*RG/RA* = 0,261 + 0,506) (10), se emplearon para

evaluar su desempeño con respecto a los datos promedios mensuales diarios medidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Depuración de la información. En la Figura 1 se ilustra un ejemplo con la estación Albán (El Cairo, Valle), donde inicialmente se aprecian los datos en su dispersión original con el modelo de Angström de tercer grado y un coeficiente de determinación de 0,562.

Los registros diarios se depuraron, descartando aquellos valores incompletos o dudosos, que quedaron por fuera del rango de una desviación estándar (Figura 2).

Finalmente, en la Figura 3 con los promedios diarios de la serie se efectuó una nueva depuración, utilizando el modelo de Angström de primer grado.

Este procedimiento se realizó en cada una de las 17 estaciones componentes del estudio, hasta obtener registros depurados y confiables para realizar las otras determinaciones.

Selección de estaciones y regresiones obtenidas por estación. Después de la verificación y complementación de las series de radiación para el período 1998

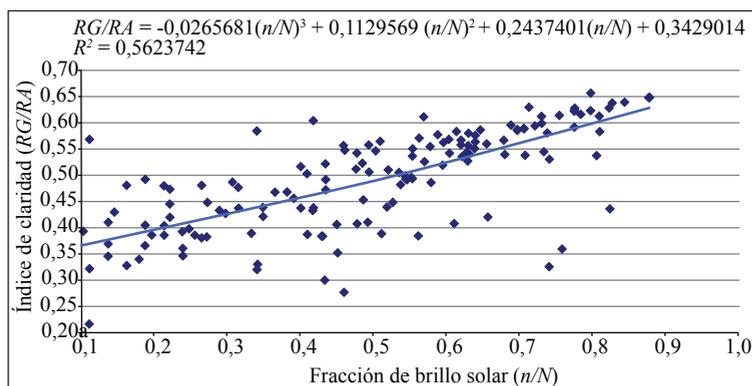


Figura 1. Variación de los datos de radiación y brillo solar con el modelo de Angström grado 3, en la estación Albán (El Cairo, Valle).

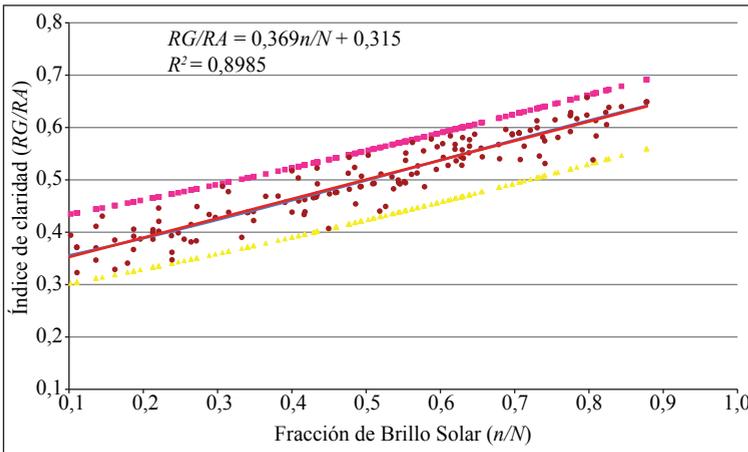


Figura 2. Primera depuración de los datos diarios de radiación y brillo solar en la estación Albán (El Cairo, Valle).

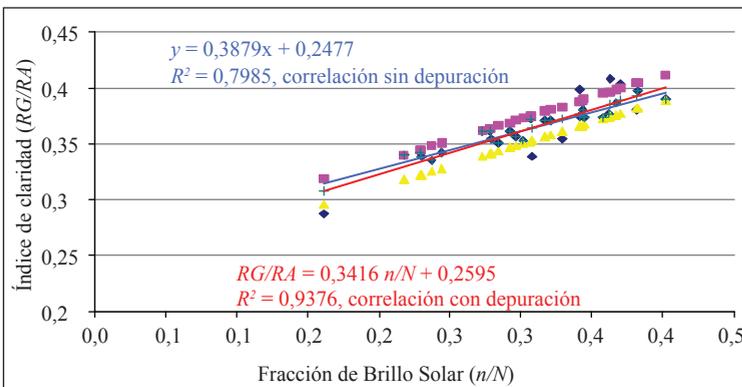


Figura 3. Modelo Angström de primer grado, para la segunda depuración de los datos de radiación y brillo solar, en la estación Albán (El Cairo, Valle).

– 2002, se identificó heterogeneidad en la información de las estaciones Gabriel M. Barriga y Alberto Santos atribuida a datos erróneos y por ello se descartaron en este estudio. Para las quince estaciones restantes se estableció la relación entre la fracción de radiación solar global (RG/RA) y la fracción de brillo solar (n/N) aplicando la fórmula modificada de Angström y el uso del programa estadístico SAS (25).

En la Tabla 3, para cada una de las localidades aparecen los coeficientes a y b cuyos valores fluctuaron entre 0,193 y 0,306 el primero y desde 0,404 hasta 0,602 el segundo. No se observa en su variación

ninguna dependencia de la latitud o la altitud. Estos valores se encuentran dentro de los rangos encontrados en distintos trabajos a través del mundo (10, 19).

El coeficiente b de la regresión es diferente de cero según el estadístico de prueba t al 5% e indica su significancia estadística y la estrecha relación entre las dos variables analizadas. Los altos coeficientes de determinación (0,717 – 0,968) fueron estadísticamente significativos. En la Figura 4 se ilustra la variación del coeficiente b para las quince estaciones estudiadas y allí se visualiza la posibilidad de efectuar algunos agrupamientos por localidades.

Tabla 3. Coeficientes de regresión para índices de radiación (RG/RA) y brillo solar (n/N) medios mensuales en 15 estaciones de la zona cafetera colombiana.

Estación	a	L.I.	L.S.	b	L.I.	L.S.	R^2
Pueblo Bello	0,306	0,276	0,337	0,516	0,45941	0,57168	0,854
San Antonio	0,239	0,225	0,252	0,436	0,39473	0,47768	0,884
El Rosario	0,193	0,172	0,214	0,559	0,51150	0,60661	0,905
Rafael Escobar	0,296	0,277	0,315	0,408	0,36695	0,44966	0,871
Santa Helena	0,214	0,204	0,223	0,436	0,40881	0,46275	0,948
Santa Bárbara	0,210	0,184	0,237	0,602	0,51781	0,68512	0,781
La Trinidad	0,251	0,243	0,259	0,466	0,44418	0,48881	0,968
Albán	0,250	0,230	0,270	0,458	0,39944	0,51716	0,807
La Catalina	0,277	0,265	0,289	0,435	0,40198	0,46810	0,923
Maracay	0,263	0,253	0,263	0,404	0,37703	0,43177	0,938
Paraguaicito	0,277	0,261	0,294	0,427	0,38363	0,46964	0,872
La Sirena	0,239	0,227	0,252	0,414	0,37297	0,45417	0,878
Manuel Mejía	0,270	0,249	0,292	0,436	0,37955	0,49141	0,807
Jorge Villamil	0,257	0,233	0,281	0,531	0,44317	0,61844	0,717
Ospina Pérez	0,239	0,218	0,259	0,484	0,42917	0,53843	0,844

L.I.: Límite inferior al 95%; L.S.: Límite superior al 95%.

Regresiones por modelos agrupados.

Partiendo de las constantes de regresión a y b , la dispersión registrada en la Figura 4 y la ubicación geográfica de cada estación (Tabla 1), se definieron cuatro grupos a saber:

- Grupo 1: Zona Norte, constituido por las estaciones Pueblo Bello, San Antonio y El Rosario.
- Grupo 2: Zona Central Andina, que comprende las estaciones Rafael Escobar, Santa Helena, Albán, La Catalina, Maracay, Paraguaicito y La Sirena.
- Grupo 3: Cordillera Oriental, vertiente occidental, con las estaciones Santa Bárbara y Jorge Villamil.
- Grupo 4: Zona Sur, integrado por las estaciones La Trinidad, Manuel Mejía y Ospina Pérez.

Con la información de los promedios mensuales diarios del índice de claridad (RG/RA) y el brillo solar relativo (n/N) se estimaron las ecuaciones para cada grupo conformado, y para un grupo adicional que reunió todas las 15 estaciones.

En la Tabla 4 se registran las características de las regresiones obtenidas. El coeficiente a de las regresiones varió entre 0,167 y 0,253, mientras que el coeficiente b se movió de 0,464 a 0,696 y fueron igualmente significativos al 5%. Los coeficientes de determinación fueron estadísticamente significativos con valores entre 0,675 y 0,871.

En las Tablas 5 a la 9 se registra el desempeño de los diferentes modelos aplicados a las estaciones representativas en comparación con los datos medidos.

La radiación solar global estimada con la fórmula de Ruanda $RG/RA = 0,242 +$

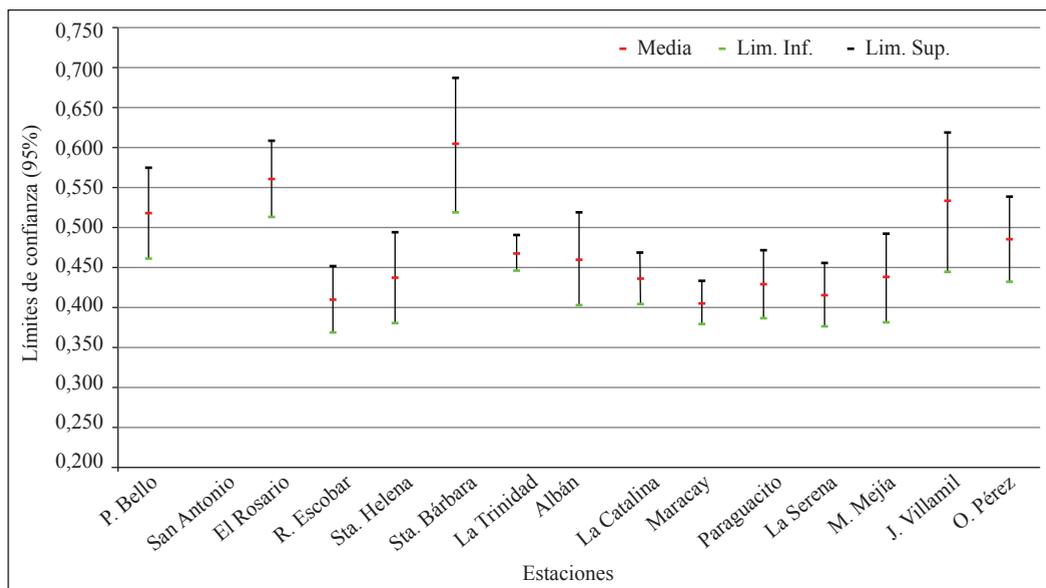


Figura 4. Coeficiente b para la fórmula Angström-Prescott con sus respectivos límites de confianza al 95%, en estaciones de la zona cafetera colombiana.

Tabla 4. Coeficientes de regresión para índices de radiación (RG/RA) y brillo solar (n/N) medios mensuales para agrupaciones geográficas y todas las estaciones en la zona cafetera colombiana.

Agrupación	Estación	a	L.I.	L.S.	b	L.I.	L.S.	R^2
Zona norte	Pueblo Bello, San Antonio, El Rosario	0,167	0,146	0,187	0,696	0,65024	0,74222	0,834
Zona central andina	Rafael Escobar, Santa Helena, Albán, La Catalina, Maracay, Paraguaicito, La Sirena	0,234	0,224	0,243	0,497	0,47142	0,52285	0,776
Cordillera Oriental	Santa Bárbara, Jorge Villamil	0,249	0,230	0,269	0,515	0,43759	0,49032	0,675
Zona sur	La Trinidad, Manuel Mejía, Ospina Pérez	0,253	0,243	0,263	0,464	0,44987	0,58015	0,871
Única	Todas	0,221	0,214	0,228	0,553	0,534	0,572	0,790

L.I. = Límite inferior; L.S. = Límite superior

0,641 (n/N) registró un buen acuerdo con los datos medidos, solamente en la estación de Pueblo Bello perteneciente a la zona norte, donde la relación fue significativa (t estimado = 0,2 menor que el t crítico = 2,2) y los valores de ESM , $RECM$ y EPM fueron bajos. Este comportamiento se atribuye a que la suma de los coeficientes

a y b es muy parecido, con valores de 0,883 en Ruanda y de 0,863 en Pueblo Bello. Varios autores han encontrado que la similitud en esta sumatoria permite que las regresiones obtenidas en unas condiciones climáticas particulares puedan ser extrapoladas a otras regiones, con buenos resultados (1, 7, 17).

Tabla 5. Valores de radiación solar global medida y estimada ($MJ.m^{-2}.día^{-1}$) con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Pueblo Bello.

Meses	RG estimada					Error porcentual					
	RG medida	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström
Enero	22,5	16,5	22,9	20,3	21,8	20,1	26,7	-1,5	10,0	3,3	10,7
Febrero	22,1	16,7	22,7	20,3	21,3	20,0	24,1	-2,7	8,0	3,4	9,5
Marzo	21,7	16,8	22,2	20,1	20,6	19,6	22,3	-2,5	7,2	5,0	9,5
Abril	20,6	16,1	20,6	18,9	18,7	18,2	21,9	0,1	8,2	9,2	11,6
Mayo	19,7	15,3	19,2	17,8	17,2	17,0	22,2	2,5	9,6	12,4	13,5
Junio	20,8	15,6	19,9	18,3	18,1	17,6	24,8	4,2	11,9	13,1	15,2
Julio	21,7	16,5	21,5	19,5	19,7	19,0	24,0	1,0	9,8	8,9	12,5
Agosto	21,2	16,4	21,2	19,3	19,4	18,7	22,9	0,2	8,9	8,6	11,7
Septiembre	19,6	15,3	19,3	17,8	17,4	17,1	22,0	1,6	9,1	11,2	12,8
Octubre	19,0	14,9	19,1	17,6	17,4	16,9	21,2	-0,8	7,5	8,3	10,8
Noviembre	19,1	15,0	19,8	17,9	18,4	17,5	21,5	-4,0	6,0	3,5	8,2
Diciembre	19,1	14,6	19,5	17,5	18,2	17,2	23,6	-2,1	8,0	4,7	9,9
<i>ESM</i>		-4,8	0,1	-1,8	-1,6	-2,3					
<i>RECM</i>		4,8	0,5	1,8	1,7	2,4					
<i>EPM</i>		23,1	-0,4	8,7	7,6	11,3					
<i>Estadístico t</i>		8,5	0,2	5,1	2,3	5,6					

Tabla 6. Radiación solar global medida y estimada ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$) con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Rafael Escobar:

Meses	RG medida	RG estimada						Error porcentual			
		Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström
Enero	18,3	15,4	20,2	18,3	17,3	17,9	16,1	-10,2	0,0	5,9	2,6
Febrero	17,3	14,7	18,5	17,1	16,0	16,4	14,6	-7,4	0,6	7,1	4,8
Marzo	17,2	14,9	18,5	17,2	16,1	16,4	13,0	-7,9	-0,5	6,2	4,2
Abril	17,4	15,2	19,0	17,6	16,5	16,9	12,7	-9,2	-1,3	5,3	3,1
Mayo	16,5	14,4	17,8	16,6	15,5	15,8	12,7	-7,9	-0,7	6,1	4,2
Junio	16,5	14,6	18,4	17,0	15,9	16,3	11,7	-11,3	-2,9	3,7	1,3
Julio	17,5	15,6	20,2	18,4	17,3	17,9	11,0	-15,3	-5,2	1,2	-1,9
Agosto	18,4	16,5	21,6	19,6	18,5	19,1	10,4	-17,4	-6,6	-0,3	-3,7
Septiembre	17,1	15,0	18,7	17,4	16,3	16,6	12,4	-9,4	-1,5	5,1	3,0
Octubre	17,2	14,9	18,8	17,4	16,3	16,7	13,1	-9,4	-1,1	5,4	3,1
Noviembre	16,1	13,9	17,4	16,1	15,1	15,4	13,8	-7,6	0,1	6,7	4,6
Diciembre	15,8	13,6	17,0	15,8	14,7	15,1	14,0	-7,8	0,1	6,6	4,4
<i>ESM</i>		-2,2	1,7	0,3	-0,8	-0,4					
<i>RECM</i>		2,2	1,8	0,5	0,9	0,6					
<i>EPM</i>		13,0	-10,0	-1,5	4,9	2,5					
<i>Estadístico t</i>		8,0	2,9	0,7	2,3	0,9					

Tabla 7. Radiación solar global medida y estimada ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$) con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Paraguaito.

Meses	RG estimada						Error porcentual					
	RG medida	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	
Enero	16,8	14,6	18,7	17,2	16,1	16,5	13,1	-11,1	-2,0	4,4	1,7	
Febrero	16,2	14,4	17,8	16,6	15,5	15,8	11,3	-9,7	-2,3	4,6	2,6	
Marzo	16,4	14,4	17,5	16,5	15,3	15,6	12,3	-6,7	-0,3	6,6	5,1	
Abril	15,9	13,9	16,6	15,7	14,6	14,8	12,6	-4,4	1,1	8,1	7,1	
Mayo	14,5	13,4	16,0	15,1	14,0	14,2	7,5	-10,3	-4,6	2,9	1,8	
Junio	14,9	13,3	16,0	15,1	14,0	14,2	10,9	-7,5	-1,4	5,7	4,3	
Julio	16,1	14,4	18,0	16,7	15,6	16,0	10,5	-12,2	-4,0	2,8	0,5	
Agosto	16,4	15,2	19,3	17,8	16,6	17,1	7,5	-17,3	-8,1	-1,2	-3,9	
Septiembre	15,6	13,8	16,6	15,7	14,6	14,7	11,2	-6,2	-0,6	6,6	5,4	
Octubre	15,8	14,3	17,5	16,4	15,3	15,6	9,8	-10,7	-3,6	3,4	1,7	
Noviembre	14,6	13,3	16,0	15,1	14,1	14,3	9,3	-9,8	-3,4	3,8	2,4	
Diciembre	14,0	12,9	15,7	14,8	13,8	14,0	7,7	-12,1	-5,4	1,9	0,3	
<i>ESM</i>		-1,4	1,5	0,4	-0,6	-0,4						
<i>RECM</i>		1,7	1,6	0,6	0,8	0,6						
<i>EPM</i>		10,3	-9,8	-2,9	4,1	2,4						
<i>Estadístico t</i>		1,7	2,9	1,2	1,7	0,9						

Tabla 8. Radiación solar global medida y estimada $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Santa Bárbara.

Meses	RG medida	RG estimada					Error porcentual				
		Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström
Enero	14,5	13,5	16,6	15,5	15,2	14,7	7,3	-14,2	-6,7	-4,6	-1,4
Febrero	13,9	13,0	15,3	14,6	14,2	13,6	6,3	-9,9	-5,0	-2,6	2,0
Marzo	13,5	13,0	14,9	14,4	14,0	13,3	3,4	-10,8	-7,0	-4,2	1,0
Abril	13,8	13,2	15,2	14,6	14,3	13,6	4,8	-10,1	-5,9	-3,2	1,7
Mayo	14,5	13,0	15,3	14,6	14,2	13,6	10,1	-5,4	-0,8	1,6	6,0
Junio	14,0	12,9	15,4	14,6	14,3	13,7	7,5	-9,8	-4,3	-2,0	2,2
Julio	16,0	13,9	17,1	16,0	15,7	15,2	12,9	-7,2	-0,2	1,7	4,8
Agosto	14,6	14,4	17,7	16,5	16,2	15,7	1,6	-21,2	-13,2	-11,1	-7,7
Septiembre	13,9	13,6	16,2	15,4	15,0	14,4	2,1	-16,1	-10,3	-7,8	-3,4
Octubre	15,2	13,9	16,9	15,9	15,6	15,0	8,3	-11,2	-4,6	-2,4	1,1
Noviembre	14,0	13,0	15,6	14,7	14,4	13,9	7,2	-11,3	-5,3	-3,0	0,9
Diciembre	13,3	12,1	14,2	13,6	13,2	12,7	8,8	-7,1	-2,2	0,2	4,5
<i>ESM</i>		-1,0	1,6	0,8	0,4	-0,1					
<i>RECM</i>		1,1	1,7	0,9	0,7	0,5					
<i>EPM</i>		6,7	-11,3	-5,5	-3,1	1,0					
<i>Estadístico t</i>		1,9	2,7	1,5	0,9	0,3					

Tabla 9. Radiación solar global medida y estimada ($\text{MJ.m}^{-2}\text{-día}^{-1}$) con sus correspondientes valores del error de sesgo medio (*ESM*), error porcentual medio (*EPM*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RECM*) y los errores porcentuales en la estación Manuel Mejía.

Meses	<i>RG</i> medida					<i>RG</i> estimada					Error porcentual				
	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström	Venezuela	Ruanda	Cenicafé	Grupo Angström	Todas Angström
Enero	16,0	14,5	18,3	16,9	16,2	16,0	16,2	16,2	16,2	16,2	9,1	-14,5	-5,8	-0,1	-1,5
Febrero	16,1	14,7	18,2	17,0	16,2	16,1	16,2	16,2	16,2	16,2	8,8	-13,2	-5,4	0,2	-0,4
Marzo	16,2	14,5	17,7	16,6	15,7	15,8	15,7	15,7	15,7	15,7	10,1	-9,5	-2,8	2,5	2,6
Abril	15,8	13,9	16,8	15,8	14,9	15,0	14,9	14,9	14,9	14,9	12,1	-5,7	0,2	5,3	5,9
Mayo	14,8	13,4	16,1	15,2	14,3	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	9,6	-8,8	-2,7	2,6	3,2
Junio	14,8	12,5	14,7	14,0	13,1	13,3	13,1	13,1	13,1	13,1	15,6	0,4	5,1	9,8	11,2
Julio	16,1	14,4	18,2	16,8	16,2	15,9	16,2	16,2	16,2	16,2	10,5	-13,3	-4,5	1,2	-0,3
Agosto	17,3	16,0	20,8	19,0	18,4	17,9	18,4	18,4	18,4	18,4	7,4	-20,6	-9,9	-3,6	-6,6
Septiembre	15,2	14,3	17,3	16,3	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	6,3	-13,9	-7,0	-1,5	-1,3
Octubre	16,2	14,7	18,1	16,9	16,1	16,0	16,1	16,1	16,1	16,1	9,5	-12,0	-4,4	1,2	0,6
Noviembre	14,1	13,1	15,6	14,8	13,9	14,1	13,9	13,9	13,9	13,9	6,8	-10,9	-5,3	0,0	1,2
Diciembre	14,9	13,5	16,6	15,6	14,8	14,7	14,8	14,8	14,8	14,8	9,3	-11,4	-4,2	1,3	1,1
<i>ESM</i>		-1,5	1,7	0,6	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2					
<i>RECM</i>		1,5	1,9	0,9	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7					
<i>EPM</i>		9,6	-11,0	-3,9	1,6	1,6	1,3	1,3	1,3	1,3					
<i>Estadístico t</i>		4,1	2,1	1,0	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3					

El modelo de Venezuela $RG/RA = 0,263 + 0,344 (n/N)$ tuvo un adecuado desempeño en las estaciones de San Antonio y El Rosario (Grupo 1), Paraguaicito (Grupo 2) y Santa Bárbara (Grupo 3). Los valores negativos de *ESM* mostraron una subestimación de la radiación y los errores porcentuales máximos estuvieron entre 9,8% y 13,1%.

El modelo de Cenicafé $RG/RA = 0,261 + 0,506 n/N$ obtenido con registros de la zona cafetera, presentó buenos resultados en las estaciones de los Grupos 2, 3 y 4, con valores bajos de *ESM* y *RECM* y errores porcentuales medios alrededor del 5%. Sin embargo, no se constituyó en una buena opción para las estaciones de Pueblo Bello, San Antonio y El Rosario situadas en la parte norte (Grupo 1), debido a que sus valores del estadístico *t* no fueron significativos.

Los modelos derivados para cada una de las agrupaciones geográficas y el correspondiente a la reunión de todas las estaciones se presentan en las Ecuaciones <7>, <8>, <9>, <10> y <11>.

Grupo 1 (estaciones Pueblo Bello, San Antonio y El Rosario):

$$RG/RA = 0,167 + 0,696 (n/N) \text{ <7>}$$

Grupo 2 (estaciones Rafael Escobar, Santa Helena, Albán, La Catalina, Maracay, Paraguaicito y La Sirena):

$$RG/RA = 0,234 + 0,497 (n/N) \text{ <8>}$$

Grupo 3 (estaciones Santa Bárbara y Jorge Villamil):

$$RG/RA = 0,249 + 0,515 (n/N) \text{ <9>}$$

Grupo 4 (estaciones La Trinidad, Manuel Mejía y Ospina Pérez):

$$RG/RA = 0,253 + 0,464 (n/N) \text{ <10>}$$

Todas las estaciones:

$$RG/RA = 0,221 + 0,553 (n/N) \text{ <11>}$$

Los modelos de los grupos 2, 3 y 4 y el de todas las estaciones fueron los de mejor ajuste, lo que se reflejó en sus valores más bajos de *ESM* (-0,6 a 0,4), *RECM* (0,5 a 0,9) y errores porcentuales promedios inferiores al 5% (Tablas 5 a la 9). En general, se observó una ligera tendencia a la subestimación de la radiación solar global a través de los valores negativos del *ESM*.

En cuanto al grupo 1 estos dos modelos dieron resultados contrastantes. Por ejemplo, en la estación Pueblo Bello no fueron significativos, lo cual es un indicativo de la existencia de condiciones climáticas diferentes a las de las otras estaciones estudiadas. En efecto, allí se recibe una notable mayor radiación solar global media de 20,6 MJ MJ.m⁻²-día⁻¹ favorecida por su régimen monomodal de la lluvia. En las otras estaciones, la radiación es menor y fluctúa entre 13,4 y 17,1 MJ.m⁻²-día⁻¹ valor característico de zonas montañosas de media ladera, con abundante nubosidad a lo largo del año, donde es común encontrar que el promedio de la duración del brillo solar no sobrepase el 50% del máximo astronómico posible (Tabla 2). Mientras que en la estación El Rosario de este mismo grupo, es posible utilizar solo el modelo de la agrupación geográfica que tiene desviaciones máximas alrededor del 10% y en la estación San Antonio pueden usarse los dos modelos con razonable precisión.

El limitado desempeño de los modelos de

los países tropicales de Ruanda y Venezuela, en la mayor parte de la zona cafetera, confirma que las constantes a y b de la regresión están influenciadas por el sitio y conviene contar con datos locales de radiación y brillo solar para conseguir estimaciones de mejor precisión (1, 10, 19).

De los dos modelos derivados para la zona cafetera (grupos geográficos y todas las estaciones) se podría utilizar cualquiera de ellos, pero el de una sola ecuación ($RG/RA = 0,221 + 0,553 (n/N)$) presenta una ventaja práctica de uso. A éstos se une la alternativa de utilizar el modelo de Cenicafé obtenido en un trabajo anterior ($RG/RA = 0,261 + 0,506 (n/N)$) que es igualmente de una sola fórmula (10).

En la estación de Pueblo Bello, de la región norte del país, donde ninguno de los modelos ensayados se ajustó, lo adecuado es emplear la ecuación obtenida para el mismo sitio que tiene la expresión $RG/RA = 0,306 + 0,516 (n/N)$ y extenderla a su zona de influencia cafetera en la Sierra Nevada de Santa Marta y posiblemente en la Serranía de Perijá.

El cálculo de la radiación solar global en la zona cafetera colombiana, con base en los coeficientes a y b obtenidos en este trabajo, debe considerarse como un primer acercamiento a los valores reales, considerando que las series de datos utilizados fueron cortas (5 años), y además, hay que tener en cuenta que los actinógrafos por su fabricación y menor precisión, solamente permiten obtener estimaciones a nivel diario.

Se recomienda en las mediciones de la radiación solar global en la zona cafetera el uso de piranómetros, que son de mayor precisión unido a un programa estricto de calibración con el patrón nacional cada 3

años, para obtener información confiable y comparable, y derivar unos coeficientes a y b más precisos, que permitirían la estimación de la radiación incluso al nivel horario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento a la doctora Esther Cecilia Montoya R. de la Disciplina de Biometría por su continuo apoyo en la parte estadística. Igualmente, a los auxiliares Luis G. Henao R., Fabián Sánchez L. y Wilmar A. Rendón G. de la disciplina de Agroclimatología, encargados del manejo de la red meteorológica de la FNC y del procesamiento de la información.

LITERATURA CITADA

1. ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C.H. Estimation of global solar radiation in Venezuela. *Interciencia* 33(4):280-283. 2008.
2. ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. *Royal meteorological society* 50:121-125. 1924.
3. AZIZ, F.A. Computation of solar radiation on horizontal surface over some Iraqi cities. *Engineering and technology* 29(10):2026-2043. 2011.
4. BAKIRCI, K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy* 34:485-501. 2009.
5. BELFORT INSTRUMENT COMPANY. Instructions book for pyranograph No 11900. Baltimore: Belfort instrument company, 1978. 8 p.
6. BURARI, F.W.; ABDUL'AZEZ, M.A.; MEDUGU, D.W. Comparative studies of measured and estimated values of global solar radiation using a constructed reliable model pyranometer and Angström-Prescott model at Bauchi, Nigeria. *Advances in applied science research* 1(1):80-88. 2010.
7. EL S., A.A.; TRABEA, A.A. Estimation of global solar radiation on horizontal surfaces over Egypt. *Egypt journal of solids* 28(1):163-175. 2005.

8. FAYADH, M.A.; GHAZI, Y.M. Estimation of global solar radiation on horizontal surfaces over Haditha, Samara, and Beji, Iraq. *The Pacific journal of science and technology* 1(1):73-82. 2010.
9. FNC; CENICAFÉ. *Disciplina de agroclimatología: Archivos meteorológicos de 1998 a 2002*. Chinchiná : Cenicafé, 2002.
10. GÓMEZ G., L.; GUZMÁN M., O. Relación empírica entre la radiación solar global y el brillo solar en el área de Cenicafé, Chinchiná, Caldas (Colombia). *Cenicafé* 46(4):205-218. 1995.
11. GUZMÁN M., O.; SIMBAQUEVA, R.O.; CHAVES C., B.; GÓMEZ G., L. Estimación de la radiación solar global y el brillo solar en el límite de la atmósfera. *Cenicafé* 43(2):61-65. 1992.
12. HALOUANI, N.; NGUYEN, C.T.; VO N., D. Calculation of monthly average global solar radiation on horizontal surfaces using daily hours of bright sunshine. *Solar energy* 50(3):247-258. 1993.
13. IDEAM; UPME. *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá: Imprenta nacional de Colombia, 2004. 175 p.
14. IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. New York : Academic press, 1983. 390 p.
15. IZIOMON, M.G.; MAYER, H. Performance of solar radiation models: A case study. *Agricultural and forest meteorology* 110:1-11. 2001.
16. JACOVIDES, C.P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agriculture and water management* 27:365-371. 1995.
17. KATIYAR, A.K.; PANDEY, C.K. Simple correlation for estimating the global solar radiation on horizontal surfaces in India. *Energy* 35:5043-5048. 2010.
18. LAMBRECHT. *Leaflet for sunshine recorder Campbell: Stokes type*. Gottingen : Lambrecht, 1991. 1 p.
19. MARTÍNEZ L., J.A.; TENA, F. The historical evolution of the Angström formula and its modifications: Review and bibliography. *Agricultural and forest meteorology* 33:109-128. 1984.
20. MUZATHIK, A.M.; NIK, W.B.W. Daily global solar radiation estimate based on sunshine hours. *International journal of mechanical and materials engineering* 6(1):75-80. 2011.
21. PODESTÁ, G.P.; NUÑEZ, L. Estimating daily solar radiation in the Argentine pampas. *Agricultural and forest meteorology* 123:41-53. 2004.
22. PRESCOTT, J.A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal society of science of Australia* 64:114-118. 1940.
23. REVFEIM, K.J.A. Estimating solar radiation income from bright sunshine records. *Royal meteorological society* 107:427-435. 1981.
24. SAFARI, B.; GASORE, J. Estimation of global solar radiation in Rwanda using empirical models. *Asian journal of scientific research* 2(2):68-75. 2009.
25. SAS INSTITUTE. *Sas user's guide: Statistics*. 5a. ed. Carolina del norte : SAS Institute, 1985. 1029 p.
26. STONE, R.J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar energy* 51:291-298. 1993.
27. WANG, Y.; ZHANG, L. Relationship between global solar radiation and sunshine duration for northwest China. *International journal of the physical sciences* 5(7):1023-1033. 2010.
28. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. 5a. ed. Geneva : WMO, 1983.