

APÉNDICE D

4. EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA

4.1. Información para la elaboración del Atlas de Radiación Solar de Colombia

En el país se cuenta con diversos tipos de estaciones meteorológicas dotadas de instrumentos para medir entre otras variables la radiación y el brillo solar, la temperatura y humedad. Algunas de ellas se encuentran en zonas que presentan problemáticas sociales de diferente índole o violencia, en condiciones particulares que afectan el adecuado funcionamiento de los instrumentos y de la continua toma de datos, perdiéndose meses o años completos de valiosa información climática.

Lo anterior se evidencia en las series de datos con largos periodos vacíos de algunas de las estaciones, que impiden su utilización en los análisis estadísticos con adecuados niveles de confianza.

Para la elaboración de la primera versión del Atlas de Radiación Solar de Colombia se empleó la información recopilada por el IDEAM durante el periodo 1980-1990 en 203 estaciones distribuidas en todo el país. Para la elaboración de la segunda edición del Atlas se contó, además, con información de cerca de 600 estaciones con información del periodo 1991-2002, como se ilustra en la Tabla 4.1, cuya ubicación se muestra en el mapa de estaciones de la página 23.

Tabla 4.1. Estaciones meteorológicas de las dos versiones de Atlas de Radiación Solar

Comparación del número de estaciones radiométricas terrestres utilizadas en la elaboración de los Atlas			
Estaciones	Atlas 1993	Atlas 2003	Incremento de puntos con información
Referencia	8*	32	400%
Radiométricas	8	39	488%
Brillo	195	383	196%
Humedad y temperatura	0	96	
Totales	203*	550	268%

* Las 8 estaciones de referencia fueron las mismas radiométricas.

Los datos de brillo solar se obtuvieron de la evaluación de cintas de registro de heliógrafos Campbell-Stokes como la de la Figura 4.1, y los datos para la radiación solar se obtuvieron de evaluar el área bajo la curva de

gráficas, como en la Figura 4.2, que ilustra el caso de un eclipse, y que fueron obtenidas de los registros de actinógrafos Fuess y adicionalmente a partir de datos directos de piranómetros Eppley Blanco-Negro y PSP.

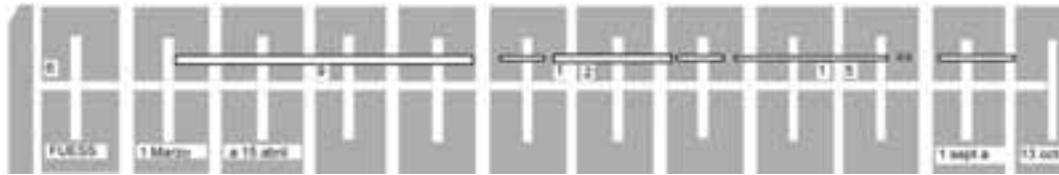


Figura 4.1. Gráfica de brillo solar

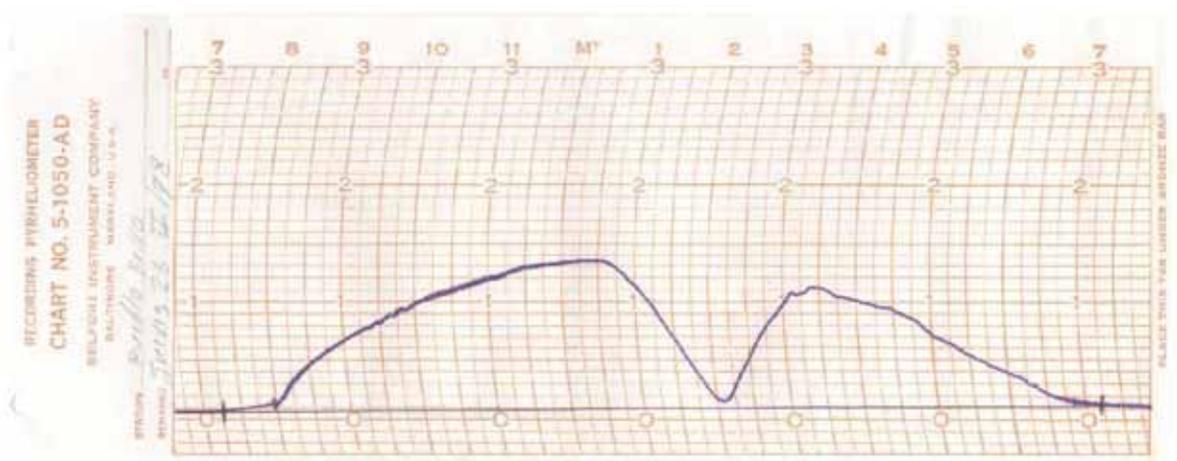


Figura 4.2. Gráfica de radiación solar de la estación de Pueblo Bello, Valledupar, Cesar, 26 de febrero de 1998, durante un eclipse solar.

4.2. Evaluación de las gráficas de radiación solar

La evaluación de las gráficas de radiación solar de actinógrafos se realizó calculando el área bajo la curva

la cual determina la energía por metro cuadrado para cada día. Este procedimiento se realizó utilizando planimetría y el programa de Autocad obteniendo errores inferiores al 5%.

4.3. Base de datos

La información se validó, modeló y almacenó utilizando hojas electrónicas de Excel con los valores diarios de radiación global, brillo, humedad, temperaturas máximas y mínimas, asociando las coordenadas de cada estación y la fecha de los datos. Posteriormente para cada día del año se realizaron los análisis estadísticos, el cálculo de la declinación (δ), la duración astronómica del día (N) y la radiación solar en la parte superior de la atmósfera (H_o).

4.4. Análisis estadístico y modelación matemática de la información

Las variables meteorológicas, si bien poseen tendencias, no permiten determinar con toda certeza su evolución; razón por la cual, a partir de series de datos de una o un conjunto de ellas, es necesario realizar análisis estadísticos que las caractericen y correlacionen de tal manera que nos permitan predecirlas con algún grado de confianza.

A continuación se exponen el modelo de Ångström y el tratamiento estadístico usado sobre los datos de radiación, brillo, humedad y diferencias de temperaturas.

4.4.1. Modelo de Ångström

Colombia, al igual que las naciones del Tercer Mundo, no posee suficientes piranómetros espectrales de precisión, instrumentos confiables para el monitoreo continuo de radiación, debido a su costo y la operación y mantenimiento. Alternativamente, instrumentos como los heliógrafos para la medición del brillo solar presentan ventajas apreciables debido a su bajo costo, sencillez y facilidad para el mantenimiento y operación, lo que ha permitido su amplia utilización en el monitoreo continuo de radiación solar.

A continuación se describen la metodología y el modelo de Ångström modificado utilizado para evaluar la información para obtener los datos de radiación solar.

4.4.2. Modelo de Ångström modificado

Desde el principio del siglo XX se ha intentado estimar la radiación solar, con base en parámetros meteorológicos. En 1924 Ångström propone una ecuación de la forma:

$$\frac{H}{H_c} = \left(\alpha + (1 - \alpha) \frac{n}{N} \right) \quad (4.1)$$

donde H_c es la radiación superficial para condiciones de cielo despejado, tomando valores promedio mensuales, n es el valor de brillo solar, y N la duración astronómica del día. Debido a la dificultad de determinar teóricamente H_c en 1940 se comenzó a trabajar con valores promedio mensuales de irradiancia y brillo; pero en lugar de considerar la irradiancia superficial en días claros, se tomó el valor de la radiación fuera del límite superior de la atmósfera. Esta ecuación se denomina modelo de Ångström modificado, o modelo de Ångström-PreScott. La expresión matemática utilizada en este caso tiene la forma

$$\frac{H}{H_o} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (4.2)$$

donde H es la integral de la radiación global medida en la superficie; H_o es la radiación solar global extraterrrestre, para un día determinado sobre la localización deseada; n es el número de horas de brillo solar medidas en superficie; N es la duración del día calculada a partir de consideraciones astronómicas; a y b son, respectivamente, el término independiente y la pendiente de la recta de ajuste determinada por mínimos cuadrados entre H/H_o y n/N

Tanto H_o como N se calculan teniendo en cuenta la posición geográfica del lugar, la declinación solar y el ángulo horario para la salida del Sol. Específicamente tenemos para cada día del año:

$$H_o = \frac{24}{\pi} \bar{I}_o \left[\frac{R_o}{R} \right]^2 (\cos \delta \cos \phi \sin \bar{\omega} + \frac{2\pi}{360} \bar{\omega} \sin \delta \sin \phi) \quad (4.3)$$

donde I_o es la constante solar 1.367 W/m^2 ; $(R_o/R)^2$ es la corrección por excentricidad de la órbita terrestre; δ es la declinación solar en radianes; ϕ es la latitud del lugar en radianes, y $\bar{\omega}$ el ángulo horario para la salida del Sol, en el día determinado en radianes.

Los cálculos astronómicos de la corrección por excentricidad, la declinación solar y el ángulo horario se realizan por medio de aproximaciones en series de Fourier, desarrolladas por Spencer en términos del ángulo orbital, que depende del día del año.

4.4.3. Análisis de los coeficientes de la Ecuación del modelo de Ångström modificado

Teniendo en cuenta que la radiación global es el resultado de sumar las componentes de radiación directa y

difusa, ver Figura 4.3, el coeficiente “a” expresa una medida de la radiación difusa recibida en la superficie bajo un cielo totalmente cubierto o nublado, es decir, en ausencia de brillo, mientras que el coeficiente “b” estaría relacionado con el valor de la radiación directa.

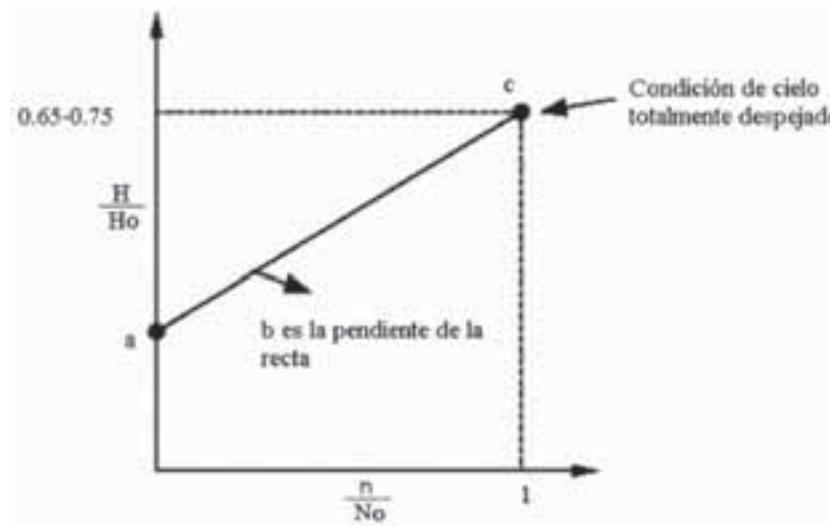


Figura 4.3. Coeficientes de la relación de Ångström.

donde H/H_o es denominado índice de claridad K_t y n/N es llamada la fracción de brillo solar S . El punto c representa la extrapolación para el caso en que se tenga un día completamente despejado y región donde la fracción de brillo se aproxima a uno.

4.4.4. Componentes difusa y directa de la radiación solar global representadas en la ecuación de Ångström

De la observación de la ecuación de Ångström podemos descomponer la radiación global incidente en sus

componentes directa y difusa. De la Figura 4.4 podemos ver cómo cuando la fracción de brillo n/N tiende a cero, en condiciones nubladas, la radiación global tiende a ser la radiación difusa debida a la dispersión de la radiación por los componentes atmosféricos (aerosoles, vapor de agua, ozono y otros gases). En cambio, en un día completamente claro n/N tiende a uno y la radiación global tiende a ser la componente directa, ya que la dispersión es baja.

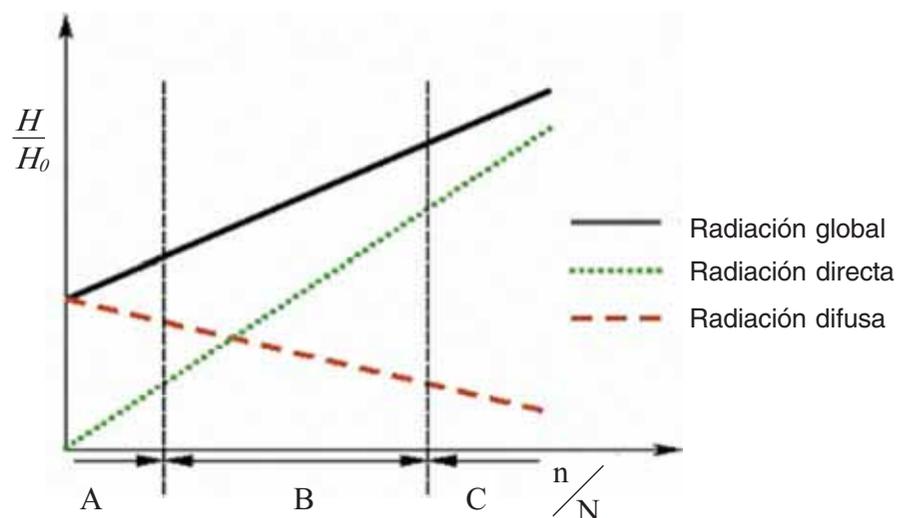


Figura 4.4. Componentes global, directa y difusa de la radiación para el modelo de Ångström.

La zona A corresponde a días nublados; la B corresponde a días normales donde la radiación global posee tanto radiación directa como difusa, y la C corresponde a días despejados donde la mayor parte de la radiación global es debida a la radiación solar directa.

4.5. Modelo de control de calidad de datos

Como modelo de control de calidad de los datos se tuvieron en cuenta los métodos de análisis de series de tiempo; para el caso de la radiación global y el brillo solar se siguió esta metodología:

1. Se analizaron las series de tiempo de datos diarios de radiación y brillo solar, comparando cada serie histórica con los datos correspondientes de radiación extraterrestre y duración astronómica del día, teniendo en cuenta que la radiación en la superficie no puede superar el 85% de la radiación en el límite superior de la atmósfera, ya que la atenúa por los efectos de absorción, dispersión y reflexión presentes en la atmósfera. En el caso del brillo solar no se puede superar el valor teórico de la duración astronómica del día.
2. Para estaciones donde se dispuso de series de tiempo superiores a cinco años, tanto de radiación como

de brillo solar, se estimaron los datos faltantes de lapsos sin información no superiores a 10 días consecutivos.

3. El dato faltante no puede pertenecer a una racha de días donde no se dispone de información. Se consideró como mínimo el tener 600 días consecutivos con información.
4. Se estima un modelo de regresión polinómica para irradiancia en función de la insolación que llamamos Modelo de Angström, grado 3, que consiste en una expansión polinómica al grado 3 del modelo de Ångström:

$$\frac{H}{H_0} = m_1\left(\frac{n}{N}\right) + m_2\left(\frac{n}{N}\right)^2 + m_3\left(\frac{n}{N}\right)^3 + b \quad (4.4)$$

5. Determinando el error estándar de la estimación y la correlación cuadrática:

$$S_{x,y} = \sqrt{\left[\frac{1}{n(n-2)} \left[n\sum y^2 - (\sum y)^2 - \frac{[n\sum xy - \sum x\sum y]^2}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \sum y \right] \right]} \quad (4.5)$$

6. Los valores faltantes y los datos que se alejen del valor estimado más de un error estándar son reemplazados por los valores estimados por regresión polinómica.

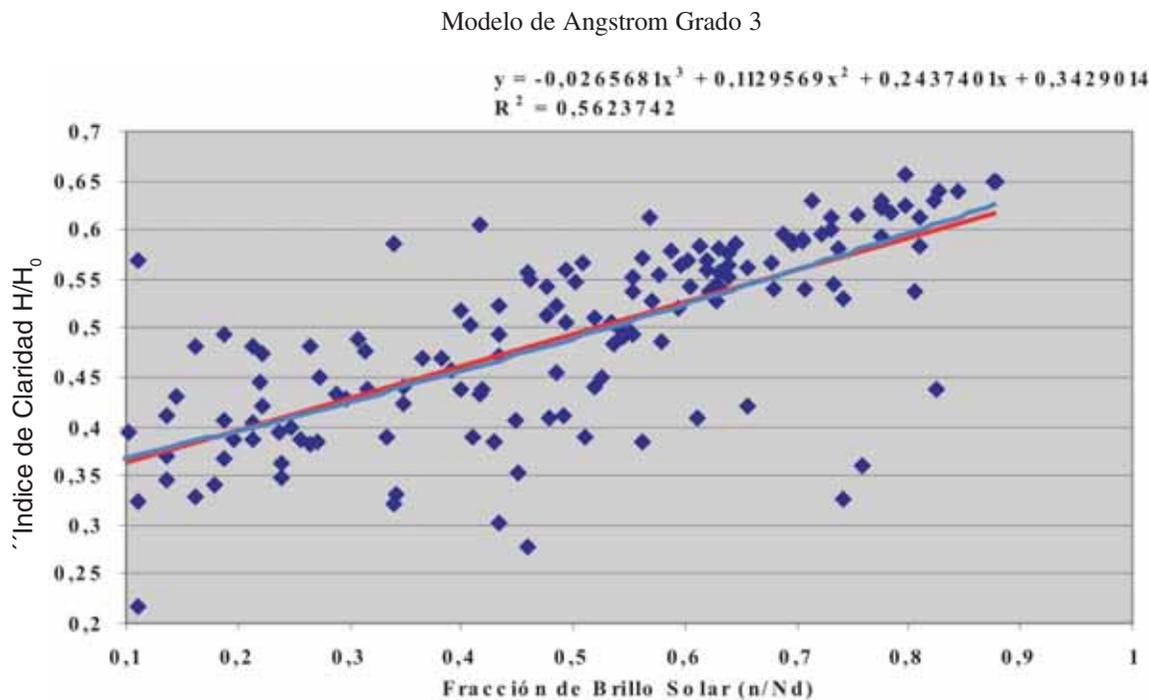


Figura 4.5. Modelo de Ångström de Tercer Grado.

7. Se realiza una nueva depuración, esta vez con una regresión lineal (Modelo de Ångström Grado 1) de-

terminando tanto el error estándar como el coeficiente cuadrático de correlación, Figura 4.6.

Serie de Fourier para Radiación Global Integral

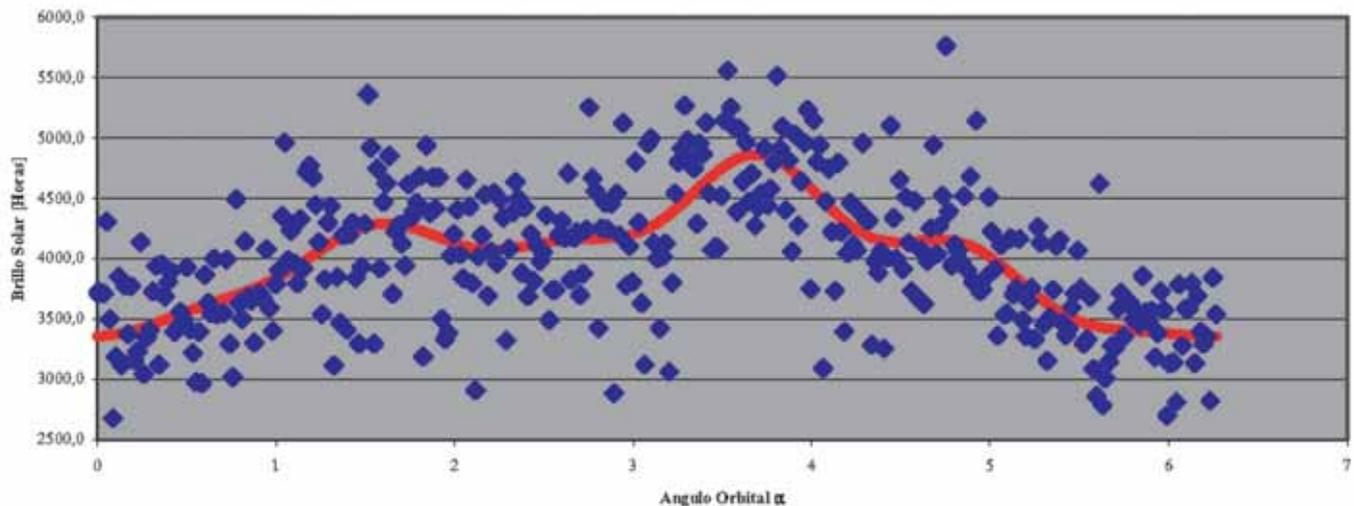


Figura 4.6 Modelo de Ångström para la serie Depurada.

8. Se aplica la distribución F para determinar si la relación entre los datos es de carácter aleatorio o si verdaderamente existe correlación. El valor F debe ser mayor en magnitud que el valor crítico de la distribución para la serie en análisis, de acuerdo con un nivel de significancia. En el caso de las series históricas de irradiancia e insolación se utilizó un nivel de significancia de 0,01, equivalente a buscar una probabilidad de correlación del 99%.

4.6. Representación en serie de Fourier del comportamiento armónico de las series de tiempo

Como pudo apreciarse en las bases teóricas del comportamiento de la radiación, la Tierra posee un movimiento cíclico tanto en su traslación orbital como en su rotación, razón por la cual la radiación solar que

alcanza al planeta presente un comportamiento similar y por lo tanto la radiación sobre la superficie tenga a su vez un comportamiento armónico representable mediante series de Fourier en la forma

$$F(\alpha) = a_0 + \sum_1^n a_n \text{sen}(n\alpha) + \sum_1^n b_n \text{cos}(n\alpha) \quad (4.6)$$

donde α es el ángulo orbital en radianes, y los coeficientes a_n y b_n se determinan integrando la función en un período. En el caso de la radiación y las variables meteorológicas (que presentan una dependencia del sol) como primera aproximación se toma un año como el período de tiempo donde se repite un ciclo, como el correspondiente a un año. A mayor grado de aproximación deseado deben utilizarse más términos de la serie de Fourier. En el caso del modelamiento para las series históricas de radiación, brillo solar, temperatura

y humedad, se aproxima la función armónica con un polinomio trigonométrico de grado seis. La función así determinada permite interpolar valores donde existen vacíos en las series de tiempo y observar desviaciones

apreciables de las variables respecto al comportamiento armónico del modelamiento de la serie. La Figura 4.7 muestra un ejemplo la serie de Fourier de radiación global de una estación radiométrica tipo.

Serie de Fourier para Radiación Global Integral

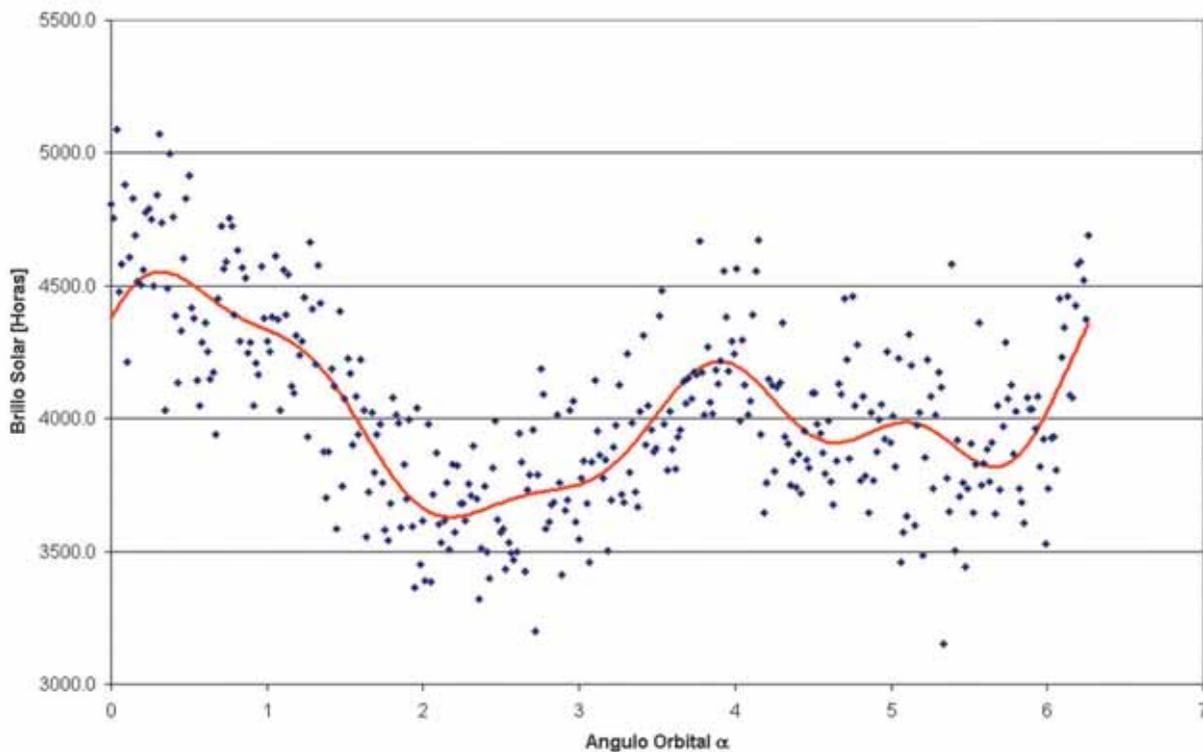


Figura 4.7. Representación en serie de Fourier para la radiación global.

4.7. Modelo multivariado para el brillo solar

El modelo de Ångström modificado depende de la existencia de series históricas para el brillo solar, de manera que sin información de brillo no sería posible determinar la irradiancia sobre un lugar en particular. Partiendo de consideraciones físicas, el brillo solar y la radiación se pueden determinar en función de las variables meteorológicas de un lugar, fuertemente correlacionadas con la variación de la radiación solar. Ver apéndice C numeral 3.7.4.

4.8. Modelado de estaciones de referencia para el territorio colombiano

Para la presente edición del Atlas de Radiación Solar se contó con series de datos de radiación global correspondientes a 71 estaciones sobre el país; de ellas se tomaron 32 como estaciones de referencia (dentro de la aplicación del modelo de Ångström modificado y del modelo multivariado para brillo solar), por poseer información simultánea diaria de radiación solar global, brillo solar, temperatura máxima, temperatura

mínima y humedad relativa, en series de tiempo completas de más de cinco años. A continuación se muestra la ubicación geográfica de las estaciones de referencia.

Tabla 4.2
Estaciones de referencia para el Atlas de Colombia

ESTACIONES	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	Longitud (°)	Latitud (°)	Elevación (m)
Alban	El Cairo	Valle	-762.167	47.667	1400
Alberto Santos	Socorro	Santander	-732.167	65.000	1499
Apto Benito Salas	Neiva	Huila	-753.000	29.667	439
Apto Eldorado P1-2	Bogotá	Bogotá	-741.500	47.167	2547
Camilo Daza	Cucuta	N. de Santander	-725.167	79.333	250
Convencion	Gabriel M. Barriga	N. de Santander	-733.333	84.167	1261
Rosario El	Venecia	Antioquia	-757.167	59.333	1600
El Tambo	Manuel Mejia	Cauca	-767.333	24.000	1735
Gaviotas	San Joseocune	Vichada	-709.333	45.500	170
Jorge Villamil	Gigante	Huila	-755.500	23.667	1500
La Catalina	Pereira	Risaralda	-757.333	47.500	1321
La Sirena	Sevilla	Valle	-759.000	42.833	1519
Maracay	Quimbaya	Quindio	-757.333	46.000	1402
Obonuco	Pasto	Nariño	-773.000	12.000	2710
Ospina Perez	Consaca	Nariño	-774.667	12.667	1700
Paraguaycito	Buenavista	Quindio	-757.333	43.833	1250
Perales Hato Opia	Ibague	Tolima	-750.667	44.500	750
Pueblo Bello	Valledupar	Cesar	-736.333	103.667	1000
San Antonio	Floridablanca	Santander	-730.667	71.000	1539
Santa Barbara	Sasaima	Cundinamarca	-744.167	49.333	1478
Santa Helena	Marquetalia	Caldas	-750.000	53.167	1395
Rafael Escobar	Supia	Caldas	-756.500	54.667	1320
Trinidad La	Libano	Tolima	-750.667	49.167	1430
U P T C	Tunja	Boyaca	-733.667	55.667	2690
Padilla	Riohacha	La Guajira	-729.333	115.333	4
La Mina	Maicao	La Guajira	72,600	11,117	80
La Selva	Rionegro	Antioquia	75,383	6,133	2090
La Sierra	Duitama	Boyaca	73,167	5,967	2700
Rafael Nuñez	Cartagena	Bolivar	75,517	10,450	2
Apto Vasquez Cobo	Leticia	Amazonas	76,233	2,350	84
Santiago Perez	Arauca	Arauca	70,733	7,067	128
Motilonia Codazzi	Agustin Codazzi	Cesar	73,250	10,000	180

De las 39 estaciones radiométricas, se determinó la variación promedio del territorio nacional, por contar con información reciente con series de tiempo superiores a los cinco años, en contraste con el resto de estaciones radiométricas, con series de tiempo muy cortas y/o discontinuas.

A partir de las estaciones de referencia se aplica en primera instancia el modelo de Ångström modificado a 383 estaciones con información promedio multianual de brillo, agrupándolas alrededor de las estaciones de referencia con las que posean características geográficas, climáticas y ecológicas similares.

Finalmente, para 96 estaciones que solo miden temperatura y humedad se empleó el modelo multivariado, completando una red de 550 puntos con información para ser interpolada sobre el territorio colombiano. La ubicación geográfica de estas estaciones aparece representada en la sección de mapas (página 23).

En comparación con la primera versión del Atlas de Radiación Solar, el número de estaciones de referencia aumentó el 400% (de 8 se pasó a 32); el de estaciones radiométricas, (de 8 a 67); en estaciones de brillo se aumentó en un 196% (de 195 se llegó a 383), además del grupo de estaciones modeladas de temperatura y humedad relativa (ver Tabla 4.1).

4.9. Interpolación digital de la información radiométrica

Para la representación espacial de los valores promedio mensuales de radiación global, radiación ultravioleta, brillo solar, ozono e índice UV se utilizó un sistema de información geográfico SIG, paquete de cómputo que permite el análisis espacial de información contenida en matrices de datos de carácter discreto. En la práctica no es posible contar con información radiométrica de cada punto del territorio del país, pero contando con la información de la red de estaciones es posible interpolar entre los puntos que conforman la malla el valor probable. El SIG, mediante un módulo de análisis espacial, permite al usuario realizar este proceso, asumiendo que cada punto tiene una influencia local que disminuye con la distancia. La información interpolada es representada como superficies de falsos colores asignados a rangos de la variable representada.

La interpolación calculada depende de una forma directa de la densidad de puntos que conforman la red, asignando un mayor peso a regiones con mayor densidad.

4.9.1. Interpretación de los mapas

Un usuario que desee hallar el valor de la radiación solar en cualquier localidad del país, en un mes determinado o el promedio diario anual, deberá interpolar la información con la isolínea más cercana a la localidad.

EJEMPLO:

Determinar la radiación solar global promedio diario del mes de abril para la ciudad de Bucaramanga.

Según el mapa de radiación global promedio diario mensual correspondiente al mes de abril, observamos que esta ciudad está localizada en una zona con valores entre 3,5 y 4,0 kWh/m². Interpolando entre los dos límites de la banda de valores se encontró el valor de 3,8 kWh/m², que se asume como la radiación solar global promedio diario mensual, correspondiente a la ciudad de Bucaramanga en el mes de abril.

4.9.2. Estimación de la radiación sobre superficies inclinadas

No es el propósito de este Atlas presentar largas tablas de valores de radiación solar, pero sí es el objetivo mostrar al lector cómo a partir de los valores de la radiación sobre una superficie horizontal se pueden calcular los valores de la energía incidente sobre una superficie inclinada con orientación y localización bien definidas.

EJEMPLO:

Determinar la radiación solar global que incide

- a) Sobre una superficie cubierta con pasto ($r=0,2$) inclinada 10° con respecto a la horizontal y orientada hacia el sur, para el día 28 de abril en Bogotá.
- b) Para una superficie orientada hacia el norte en el mismo lugar y en la misma fecha.

SOLUCIÓN

a) $\beta = 10^\circ$

$\gamma = 30^\circ$

- De acuerdo con la localización geográfica, $\phi = 4^\circ 18'$
- De acuerdo con la época del año, $nd = 118$; del apéndice A, ecuaciones (1-2) y (1-4), $\delta = 13^\circ 53'$
- De la ecuación 1-9, $\omega_s = 91^\circ 04'$
- De la ecuación 3-35, $\omega_s' = 91^\circ 04'$
- De la ecuación 3-34, $\overline{Rb} = 0,92$
- De la ecuación 2-3, $H_{\bar{o}} = 10,3 \text{ kWh/m}^2$ y de acuerdo con el mapa de radiación solar promedio diario para el mes de abril $\overline{H} = 3,7 \text{ kWh/m}^2$
- De la ecuación 3-5a, $K_t = 0,36$
- De la ecuación 3-19, $\overline{Hd}/\overline{H} = 0,83$
- De la ecuación 3-32, $\overline{R} = 0,98$
- De la ecuación 3-31, $\overline{H}(10) = 3,6 \text{ kWh/m}^2$

b)

$\beta = 10^\circ$

$\gamma = 30^\circ$

$\phi = 4^\circ 18'$

$nd = 118$

$\omega_s = 91^\circ 04'$

- De la ecuación 3-37, $\omega_s' = 91^\circ 04'$
- De la ecuación 3-36, $\overline{Rb} = 1,05$
- De la ecuación 2-3, $H_o = 10,3 \text{ kWh/m}^2$
- De acuerdo con el mapa de radiación solar promedio diario para el mes de abril.
 $\overline{H} = 3,7 \text{ kWh/m}^2$
- De la ecuación 3-5a, $K_t = 0,36$
- De la ecuación 3-19, $\overline{Hd}/\overline{H} = 0,83$
- De la ecuación 3-32, $\overline{R} = 1,01$
- De la ecuación 3-31, $\overline{H}(10) = 3,74 \text{ kWh/m}^2$

4.10. Distribución de la intensidad de la radiación solar en Colombia

El país está caracterizado por las regiones: Andina, Atlántica, Pacífica, Orinoquia y Amazonia.

La intensidad de la radiación solar en la región Andina colombiana muestra que las zonas de los valles del Cauca y Magdalena poseen el mayor potencial de esta región, y a medida que se asciende hacia las cimas de las cordilleras ese potencial va disminuyendo gradualmente, con excepción de algunos núcleos localizados en zonas llamadas altiplanos, donde se observa un potencial solar mayor comparado con el de las laderas.

En las regiones costeras: atlántica y pacífica, los resultados de la evaluación del recurso solar del país muestran en la región noreste de la costa atlántica (La Guajira) un potencial solar promedio diario entre 5,0 y 6,0 kWh/m², el mayor del país. Este valor va disminuyendo gradualmente en dirección sur-oeste hacia la costa pacífica, donde se presenta el menor potencial solar del país, con valores menores de 3,5 kWh/m², aunque posee una gran zona con valores entre 4,0 y 4,5

Las regiones de la Orinoquia y Amazonia, que comprenden las planicies de los Llanos Orientales y zonas de las selvas colombianas, presentan una variación ascendente de la radiación solar en sentido suroeste-noreste, verificándose valores asimilables a los de La Guajira en el noreste (Puerto Carreño).

La Tabla 4.3 ilustra los rangos de disponibilidad de energía solar promedio multianual por regiones:

Tabla 4.3.
Rango anual de disponibilidad de energía solar por regiones

REGIÓN	kWh/m ² /año
GUAJIRA	1.980 - 2.340
COSTA ATLÁNTICA	1.260 - 2.340
ORINOQUIA	1.440 - 2.160
AMAZONIA	1.440 - 1.800
ANDINA	1.080 - 1.620
COSTA PACÍFICA	1.080 - 1.440

BIBLIOGRAFÍA

1. Canavos, G. C. Probabilidad y estadística, aplicaciones y métodos. México: Mc Graw Hill, 651p, 1988.
2. Callejas, H., y Castellanos, Julia. Consideraciones sobre los regímenes de temperatura del suelo en Colombia. Bogotá: 112p, 1988.
3. Duffie, J. A., y Beckwan, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & sons, 761p, 1980.
4. Espinal, S. Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 238p, 1977.
5. Sayigh, A. A. M. Solar Energy Engineering. New York: Academic Press, 476p, 1977.
6. SAS Institute INC. SAS/STAT Guide for Personal Computers, Version 6 Edition. North Carolina: 378p, 1985.
7. SAS Institute INC. SAS Procedures Guide for Personal Computers, Version 6 Edition. North Carolina: 1985, 373p.

CONVERSIÓN DE ALGUNAS UNIDADES

ENERGÍA Y POTENCIA

$$1 kWh = 3,6 MJ$$

$$1 Btu = 1,05506 kJ = 252cal$$

$$1 kcal = 4,1868J$$

$$1 \frac{kcal}{s} = 4,1868 kW$$

$$1 \frac{Btu}{pie^2} = 0,271cal/cm^2$$

$$1 kcal/h = 1,163 W$$

$$1 langley(ly) = 1 \frac{cal}{cm^2}$$

$$1 \frac{ly}{min} = 0,06978 \frac{W}{cm^2}$$

$$1 \frac{gcal}{cm^2/h} = 11,63 \frac{W}{m^2}$$

$$\frac{cal}{cm^2} = 11,63 \frac{Wh}{m^2}$$

