

CÁLCULO Y MAPEO DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA Y DIFUSA EN COSTA RICA

Jaime Wright

Departamento de Física, Universidad Nacional

Apdo. 86-3000 Heredia, Costa Rica

Email: jwright@una.ac.cr

RESUMEN

El conocimiento de la radiación solar directa y difusa es de importancia fundamental en la valoración del potencial energético de Costa Rica, por lo que este trabajo está enfocado en el cálculo y en el trazado de mapas de contornos de la radiación solar directa y difusa basados en sesenta y dos estaciones radiométricas esparcidas en todo el territorio nacional. En el trazado de estos contornos se utilizaron valores experimentales y predichos de la radiación directa y difusa. Adicionalmente, se comparan la radiación solar directa y difusa durante la época seca y la época lluviosa en las seis regiones climáticas del país: Valle Central, Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Zona Norte y Vertiente del Caribe. Los niveles medios diarios observados de radiación directa oscilan entre 6.1 y 10.1 MJ/m², con valores más altos en las secciones norte de la Vertiente del Pacífico, al oeste del Valle Central y en las cimas de las montañas más altas. Los valores más bajos coinciden con la Zona Norte y la Vertiente del Caribe. Los valores más altos de radiación difusa coinciden con la Zona Norte y el Pacífico Sur. Se observa un incremento de la radiación solar directa hasta de un 40% en los meses de la época seca.

Palabras claves: Radiación solar, estación radiométrica.

ABSTRACT

Knowledge of direct and diffuse solar radiation in the area is vital importance for the use of solar energy, since it is a prerequisite information for the assessment and design of solar energy system. The work presented here focus on calculation and plotting of contours values

of direct and diffuse solar radiation maps based on sixty two scattered radiometric stations nation wide. In the plotting of these contours experimental and predicted values are used, these are compared with the period of dry and rainy season into the six main climate regions of Costa Rica: Central Valley, North Pacific, Central Pacific, South Pacific, North Zone and Caribbean Region. The observed daily mean levels of direct solar radiation oscillate between 6.1 and 10.1 MJ/m² with higher values in the North Pacific, western part of the Central Valley and in the tops of the highest mountains. The lowest values agree with the North Zone and the Caribbean Region. The highest values of diffuse solar radiation agree with the North Zone and the South Pacific. It is observed an increase of 40% of the direct radiation during dry season months.

Keywords: Solar radiation, radiometric stations.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento climático de la radiación solar de un área en particular es de vital importancia en la utilización de la energía solar, debido a que es una información prerequisite en la valoración y en el diseño de cualquier sistema que emplea la energía solar. La radiación solar en cualquier localidad tiene una componente directa y una componente difusa. La radiación solar directa es la única componente susceptible de ser concentrada utilizando colectores concentradores; sin embargo, la radiación difusa permite también importantes ganancias de energía, aun con cielo cubierto de

nubes, usando colectores planos. En Costa Rica no se hacen observaciones rutinarias de radiación directa ni radiación difusa. Únicamente se cuenta con piranómetros en sus estaciones meteorológicas de clase A, que brindan información diaria sobre la radiación solar global en un plano horizontal, por eso es necesario en algunas ocasiones –cuando es requerida– la utilización de diferentes modelos atmosféricos que usan datos meteorológicos para calcular la radiación solar (GOLDBERG *et al.*, 1979, BARBARO *et al.*, 1981, BĂDESCU, 1981, MCKAY, 1984).

La cantidad de radiación solar difusa sobre una superficie horizontal puede ser estimada utilizando parámetros meteorológicos, tales como la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica, el número de horas con sol brillante o heliofanía, etc. BARBARO *et al.* (1981) e IDERIAH (1981) son de los pocos investigadores que han incurrido en la predicción de la radiación directa y difusa en condiciones de cielos nublados. La primera aplicación del modelo de BARBARO *et al.* (1981) fue realizada en Palermo, Italia, en condiciones de un clima mediterráneo y probada posteriormente por BĂDESCU (1981, 1987) en condiciones de un clima continental. Luego WRIGHT (1988a) probó la validez de este modelo en condiciones de un clima tropical.

El modelo de BARBARO, COPPOLINO, LEONE y SINAGRA (1981), llamado modelo *BCLS* (BĂDESCU, 1981), ya fue probado en Costa Rica por WRIGHT (1988a) en la estimación de la radiación solar global, a través de las estimaciones de las componentes directa y difusa de la radiación solar. El modelo *BCLS* es de amplio interés e importancia, porque es uno de los diez modelos de simulación de la radiación solar en una superficie horizontal probado por la Agencia Internacional de Energía (MCKAY, 1984). La importancia del modelo *BCLS* es que permite calcular independientemente la radiación solar directa y difusa –en condiciones de cielos nublados– en función de las coordenadas geográficas del lugar, agua precipitable y horas de sol en porcentaje. Una breve descripción del modelo *BCLS* puede encontrarse en el Apéndice de este trabajo.

El método geoestadístico (“kriging”) que se

utilizó en este trabajo para interpolar y extrapolar los datos de radiación directa y difusa, para luego graficarlos en forma de mapas de contornos con el Surfer 8, se diferencia de todos los otros métodos en que utiliza en la estimación espacial la estructura realmente existente en el campo, que se obtiene de los valores experimentales. Comenzó a ser desarrollado en el campo de la minería por KRIGE (1951), y fue MATHERON (1962, 1963a y 1963b) quien lo denominó “krigaje” (kriging, en inglés) en su homenaje. Este método se desarrolla en dos etapas: a) análisis y modelado de la covariancia espacial y b) estimación de los valores minimizados de los errores cometidos en el procedimiento, por lo que se dice que este método geoestadístico de interpolación lineal es “óptimo”, ya que incorpora la estructura del campo del parámetro medido, proporcionando así una metodología objetiva para el trazado de cartas con la distribución espacial de cualquier variable meteorológica, estando limitada su validez a zonas que puedan ser puestas homogéneas (AGUIAR, 1999). En el país se ha aplicado últimamente esta metodología en varios trabajos con información obtenida en la superficie terrestre (WRIGHT, 2001, 2002).

MATERIAL Y MÉTODOS

Observaciones de veintisiete estaciones medidoras de radiación global, junto a treinta y cuatro estaciones medidoras de brillo solar y una estación experimental medidora de radiación global y directa, ubicada en la Universidad Nacional (UNA), fueron utilizadas en el desarrollo de este trabajo. Las mediciones experimentales en la UNA fueron efectuadas en el Patio Solar del Departamento de Física, utilizando un piranómetro Eppley (radiación global) y un pirheliómetro Eppley (radiación directa). Los datos de radiación difusa en la UNA fueron obtenidos de la diferencia entre los valores experimentales de la radiación global y directa (WRIGHT, 2001). Los datos de radiación solar global fueron obtenidos de la información heliográfica (WRIGHT, 1981, 2002), en aquellas localidades que no existen registros de radiación solar global en el país. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) no realiza mediciones de radiación directa ni difusa, excepto las observaciones hechas de radiación difusa en la Estación Experimental Fabio Baudrit de la Universidad de Costa Rica (UCR)

durante el período 1983-1985 (WRIGHT, 1988b). Este trabajo se ha enfocado en la creación de datos relevantes sobre los cuales—eventualmente—pueden valorarse trabajos basados en la tecnología de la energía solar en la región.

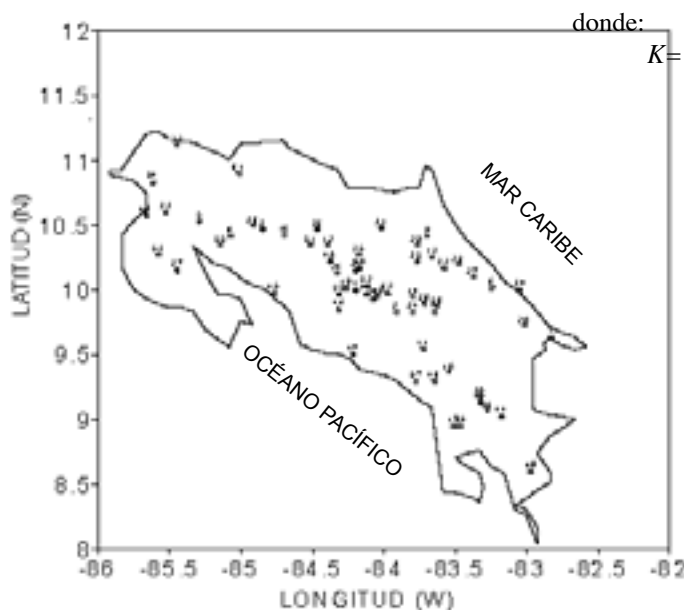
Costa Rica está ubicada en la parte tropical del Hemisferio Norte entre $8^{\circ} 15' - 11^{\circ} 00' N$ y $83^{\circ} 30' - 86^{\circ} 00' W$, por lo que forma parte del istmo centroamericano y está bordeada por el Mar Caribe por el este y el Océano Pacífico por el oeste. La Figura 1 ubica las sesenta y dos estaciones radiométricas que se escogieron para este trabajo. La Tabla 1 detalla el nombre correspondiente a cada estación asociado a la Figura 1, el tipo de instrumento que se utilizó, el período aproximado en que funcionó, la ubicación por latitud, la ubicación por longitud y la elevación en metros sobre el nivel del mar. Las mediciones de la radiación solar global fueron ejecutadas por el IMN con los piranómetros Robitzsch bimetalicos. Según estudios realizados por NEACSA Y SUSAN (1984), CIOCOIU *et al.* (1974) y CRETEANU (1984) en Budapest, Rumania, estos piranómetros tienen un error relativo máximo del 5%; con el objeto de evitar el deterioro en la medición de los piranómetros con el tiempo, puesto que éstos no han sido calibrados

periódicamente (WRIGHT, 1981), en los cálculos de las constantes climáticas a y b (Tabla 2), se han utilizado períodos no mayores de tres años después de la instalación de los instrumentos.

Relación entre los valores diarios, medios y mensuales de la radiación difusa y global

En su trabajo ya considerado como clásico LIU y JORDAN (1960) encontraron una serie de correlaciones entre los valores medidos de la radiación global y difusa buscando una forma generalizada de lograr su aplicabilidad a otras localidades que no dispusieran de información sobre ambas variables. Posteriormente, WRIGHT (1988a, 1988b y 2001) volvió a analizar las mismas a partir de mediciones directas o indirectas de radiación global y difusa para trece localidades de Costa Rica. Una vez que se hubo comprobado que las correlaciones eran “aceptables” y representaban climas similares a otras regiones del mundo, se determinó una ecuación de regresión por el método de los mínimos cuadrados de la forma de la ecuación (1), que presenta un buen ajuste para la estimación de la radiación difusa en el país:

$$H_d/H = a + b H/H_0, \quad (1)$$



donde:

$K = H_d/H$ es la fracción difusa de la radiación difusa H_d y la radiación solar global H , ambas sobre una superficie horizontal, en unidades de energía por unidad de área, MJ/m².

$K_T = H/H_0$ es el índice de claridad, definido como el cociente entre la radiación global H y la radiación extraterrestre H_0 , ambas sobre una superficie horizontal, en unidades de energía por unidad de área, MJ/m².

La Tabla 2 muestra los valores de las constantes climáticas a y b y el coeficiente de correlación lineal r , el período y el método utilizado. Se emplearon las constantes a y b en la ecuación (1) para estimar los valores de la radiación difusa, tomando como criterios la zona geográfica y la altura

Figura 1. Ubicación en el mapa de Costa Rica de las 62 estaciones con registros radiométricos.

Tabla 1. Lista de las estaciones meteorológicas con mediciones piranométricas, heliográficas* o ambas a la vez.

Nº	Estación	Lati- tud (N)	Longi- tud (W)	Alti- tud (m)	Perío- do	Nº	Estación	Lati- tud (N)	Longi- tud (W)	Alti- tud (m)	Perío- do
1	Aerop. J. Santamaría (*)	10 00	84 12	932	71-99	32	Las Delicias Guácimo (*)	10 10	83 35	200	69-86
2	Agua Caliente (*)	9 50	83 55	1325	66-74	33	Liberia Llano Grande (*)	10 36	85 32	144	76-01
3	Arenal (*)	10 28	84 51	520	92-99	34	Limón	10 00	83 03	3	69-00
4	Atirro (*)	9 50	83 39	900	64-75	35	Los Diamantes Guápiles	10 13	83 46	249	71-87
5	Bagaces	10 32	85 18	90	76-84	36	Muelle de San Carlos (*)	10 28	84 28	60	82-86
6	Boston (*)	10 01	83 15	16	78-86	37	Nicoya	10 09	85 27	120	70-84
7	Bribri (*)	9 38	82 50	32	78-84	38	Nueva Tronadora	10 30	84 54	580	77-83
8	Cañas (*)	10 25	85 05	95	71-78	39	Palmar Sur	8 57	83 28	16	73-92
9	Carolina Tica (*)	10 25	83 42	30	71-75	40	Palmira (*)	10 13	84 23	2010	73-83
10	Cedral (*)	9 22	83 33	1450	80-84	41	Pavas Aeropuerto	9 58	84 08	1132	76-01
11	Cerro de la Muerte (*)	9 33	83 44	3365	72-84	42	Pindeco	9 08	83 20	397	85-94
12	Centro Rural (*)	10 21	84 24	600	1981	43	Potrero Grande	9 01	83 11	183	70-83
13	Cobal	10 15	83 40	55	71-77	44	Playa Panamá	10 35	85 40	3	77-81
14	Coliblanco (*)	9 57	83 48	2200	76-83	45	Puntarenas	9 59	84 46	3	70-83
15	Coto 47 (*)	8 36	82 59	8	84-96	46	Puriscal	9 51	84 19	1102	75-99
16	El Chato (*)	10 26	84 42	740	78-84	47	Quepos	9 29	84 12	6	83-99
17	Finca Exp. 05 (*)	8 57	83 31	10	77-81	48	Repunta (*)	9 18	83 39	580	62-81
18	Finca Exp. 45 (*)	8 36	82 58	12	77-81	49	Sabanilla	9 57	84 03	1200	83-94
19	Fabio Baudrit	10 01	84 16	840	64-01	50	San José	9 56	84 05	1172	69-81
20	Finca 12 La Estrella (*)	9 43	83 01	15	76-87	51	Santa Clara	10 21	84 31	170	87-99
21	La Laguna de Fraijanes	10 09	84 12	1640	76-01	52	Santa Lucía Heredia (*)	10 01	84 07	1200	83-00
22	Hacienda Alemania (*)	11 07	85 27	290	80-96	53	Santa Cruz Guanacaste	10 16	85 35	54	84-95
23	Hacienda El Carmen	10 12	83 29	15	79-98	54	Santa Rosa	10 50	85 37	315	72-74
24	Hacienda Cachí (*)	9 50	83 48	1100	71-96	55	Taboga	10 21	85 09	40	84-00
25	La Fortuna (*)	10 28	84 39	250	78-81	56	Térraba (*)	9 04	83 17	360	80-84
26	La Luisa (*)	10 08	84 20	1250	76-87	57	Tinamaste (*)	9 18	83 47	680	82-92
27	La Lola	10 06	83 23	40	72-91	58	Turrialba CATIE	9 53	83 38	602	66-93
28	La Margarita (*)	9 54	83 43	1080	72-91	59	Turrúcares (*)	9 58	84 19	639	73-75
29	La Mola (*)	10 21	83 46	70	79-01	60	Universidad Nacional	10 02	84 05	1150	96-00
30	La Piñera (*)	9 11	83 20	350	72-84	61	Upala	10 54	85 01	50	83-95
31	La Rebusca	10 29	84 01	26	94-99	62	Volcán Irazú	9 59	83 51	3400	72-81

* Mediciones hechas a partir de la heliofanía.

Tabla 2. Valores de a y b en la ecuación de regresión $K = a + b K_T$ y el coeficiente de correlación lineal r , con base en los valores diarios, medios y mensuales del índice de claridad K_T , según WRIGHT (1988a, 1988b y 2001).

Estación radiométrica	a	b	r	Período	Observaciones
Departamento de Física,					
Universidad Nacional	1.097	-1.137	-0.90	1995-1996	Datos experimentales
Fabio Baudrit	0.908	-0.981	-0.97	1983-1985	Datos experimentales
Puntarenas	0.83	-0.79	-0.89	1970-1972	Modelo BCLS
Limón	0.78	-0.61	-0.71	1970-1972	Modelo BCLS
Santa Rosa	0.85	-0.79	-0.92	1972-1974	Modelo BCLS
Turrialba	1.1	-1.28	-0.90	1965-1967	Modelo BCLS
Volcán Irazú	1.06	-1.10	-0.95	1972-1973	Modelo BCLS
San José	1.21	-1.55	-0.84	1972-1974	Modelo BCLS
Playa Panamá	0.917	-0.914	-0.90	1979	Modelo BCLS
Cobal	0.92	-0.83	-0.94	1973-1975	Modelo BCLS
Palmar Sur	1.2	-1.17	-0.97	1978-1979	Modelo BCLS
Los Diamantes	1.29	-1.64	-0.96	1974	Modelo BCLS
Nicoya	0.97	-1.03	-0.89	1971-1973	Modelo BCLS

sobre el nivel del mar de cada estación (ver Tabla 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mapas de contornos de las Figuras 2 a 8 muestran la distribución espacial de la radiación solar directa, diaria, media y mensual y el promedio anual sobre una superficie horizontal en la República de Costa Rica, en unidades de energía por unidad de área (MJ/m^2), los cuales fueron generados por el Surfer 8. Estas figuras muestran un gradiente más pronunciado a lo largo de las cordilleras Central y de Guanacaste en los meses de la época seca; asimismo, un gradiente menos pronunciado en los meses de la época lluviosa. Lo que demuestra que a mayor nubosidad, que generalmente está asociada a la precipitación durante la época lluviosa, resulta ser menor la variación espacial de la radiación solar directa sobre nuestro territorio. También puede observarse en estas figuras, que los valores mínimos se ubican en la Zona Norte, Pacífico Sur, llanuras del Caribe, falda sur del cerro Chirripó y Buena Vista; mientras los valores máximos se establecen en el Volcán Irazú, la sección oeste del Valle Central y el Pacífico Norte.

La Figura 2 muestra los mapas de contornos de los promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal durante los meses de enero y febrero. Las magnitudes más altas del mes de enero se establecen al oeste del Valle Central [Aeropuerto Juan Santamaría ($12.2 \text{ MJ}/\text{m}^2$), Fabio Baudrit ($12.5 \text{ MJ}/\text{m}^2$), Pavas ($12.2 \text{ MJ}/\text{m}^2$) y Turrúcares ($14.0 \text{ MJ}/\text{m}^2$)]; en las estaciones ubicadas en los puntos más altos del país [Volcán Irazú ($16.3 \text{ MJ}/\text{m}^2$), Cerro de la Muerte ($11.8 \text{ MJ}/\text{m}^2$), Palmira ($11.8 \text{ MJ}/\text{m}^2$) y Fraijanes ($12.2 \text{ MJ}/\text{m}^2$)] y en el Pacífico Norte [Santa Cruz ($13.3 \text{ MJ}/\text{m}^2$) y Taboga ($12.2 \text{ MJ}/\text{m}^2$)]. Mientras las magnitudes más bajas se ubican en la Zona Norte [La Fortuna de San Carlos ($3.6 \text{ MJ}/\text{m}^2$)] y en las llanuras de la Vertiente del Caribe [Cobal ($4.0 \text{ MJ}/\text{m}^2$) y Los Diamantes ($4.0 \text{ MJ}/\text{m}^2$)]. Los valores diarios, medios y mensuales de la radiación directa se incrementan durante el mes de febrero; con valores más altos al oeste del Valle Central [Aeropuerto Juan Santamaría ($13.7 \text{ MJ}/\text{m}^2$), Fabio Baudrit ($14.3 \text{ MJ}/\text{m}^2$) y Turrúcares ($15.7 \text{ MJ}/\text{m}^2$)]; el Pacífico Norte [Santa Cruz ($15.0 \text{ MJ}/\text{m}^2$) y Taboga ($15.0 \text{ MJ}/\text{m}^2$)] y en las cimas de las montañas más altas [Volcán Irazú ($19.2 \text{ MJ}/\text{m}^2$)] y

Cerro de la Muerte (13.7 MJ/m^2). Mientras los valores más bajos se ubican en la Zona Norte [La Fortuna (3.6 MJ/m^2)] y en la Vertiente del Caribe [Los Diamantes (4.0 MJ/m^2) y Cobal (4.0 MJ/m^2)].

La Figura 3 muestra los mapas de contornos de los promedios diarios, medios y mensuales sobre una superficie horizontal de la radiación directa durante los meses de marzo y abril. Se observa un incremento en los valores de la radiación directa en el mes de marzo respecto a los primeros dos meses del año; los valores más altos se ubican al oeste del Valle Central [Aeropuerto Juan Santamaría (15.4 MJ/m^2) y Fabio Baudrit (14.5 MJ/m^2)]; el Pacífico Norte [Santa Cruz (14.5 MJ/m^2), Taboga (15.4 MJ/m^2) y Santa Rosa (14.1 MJ/m^2)] y en las regiones altas [Volcán Irazú (20.1 MJ/m^2), Cerro de la Muerte (14.2 MJ/m^2), Palmira (14.2 MJ/m^2) y Santa Lucía (15.4 MJ/m^2)]. Mientras los valores más bajos se ubican en las llanuras del Caribe [La Lola (4.7 MJ/m^2)] y en la Zona Norte [La Fortuna (3.4 MJ/m^2)]. Los valores de la radiación directa del mes de abril (Figura 3) son ligeramente menores que los del mes de marzo; los valores más altos de abril se establecen al oeste del Valle Central [Turricares (14.1 MJ/m^2), Aeropuerto Juan Santamaría (13.6 MJ/m^2)]; el Pacífico Norte [Santa Rosa (13.9 MJ/m^2) y Taboga (13.8 MJ/m^2)] y en las partes altas [Volcán Irazú (15.0 MJ/m^2) y Palmira (13.7 MJ/m^2)]. Mientras los valores más bajos se ubican en el Pacífico Sur [Exp. Finca 45 (4.7 MJ/m^2)]; la

Vertiente del Caribe [La Lola (4.3 MJ/m^2)] y en la Zona Norte [La Fortuna (3.2 MJ/m^2)].

La Figura 4 muestra los mapas de contornos de los promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa en los meses de mayo y junio; en esta figura se observa que la radiación directa comienza a descender debido al aumento de nubosidad y precipitación, típico de la época lluviosa en nuestro territorio. Los valores más altos del mes de mayo se establecen en el Pacífico Norte [Santa Rosa (10.2 MJ/m^2), Taboga (10.5 MJ/m^2) y Santa Cruz (10.3 MJ/m^2)] y al oeste del Valle Central [Turricares (10.4 MJ/m^2) y Palmira (10.9 MJ/m^2)]. Mientras los valores más bajos se establecen en el Pacífico Sur [Exp. Finca 05 (3.3 MJ/m^2), Exp. Finca 45 (4.0 MJ/m^2) y Palmar Sur (4.3 MJ/m^2)]; la Vertiente del Caribe [La Lola (4.3 MJ/m^2)] y en la Zona Norte [Muelle de San Carlos (4.7 MJ/m^2)]. Los valores más altos del mes de junio se establecen en el Pacífico Norte [Santa Cruz (9.9 MJ/m^2)] y en la Zona Norte [La Rebusca (8.5 MJ/m^2)]. Mientras los valores más bajos se ubican en el Pacífico Sur [Exp. Finca 05 (3.3 MJ/m^2) y Cedral (3.4 MJ/m^2)]; en el Valle Central [San José (3.4 MJ/m^2) y Sabanilla (3.4 MJ/m^2)] y en las llanuras de la Vertiente del Caribe [La Lola (3.8 MJ/m^2)].

La Figura 5 muestra los mapas de contornos de los promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en los meses de julio y agosto. Se observa

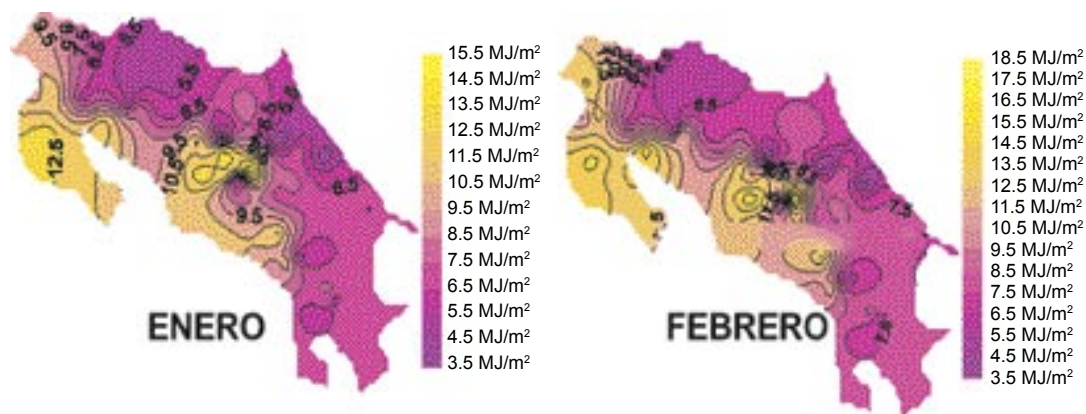


Figura 2. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de enero y febrero.

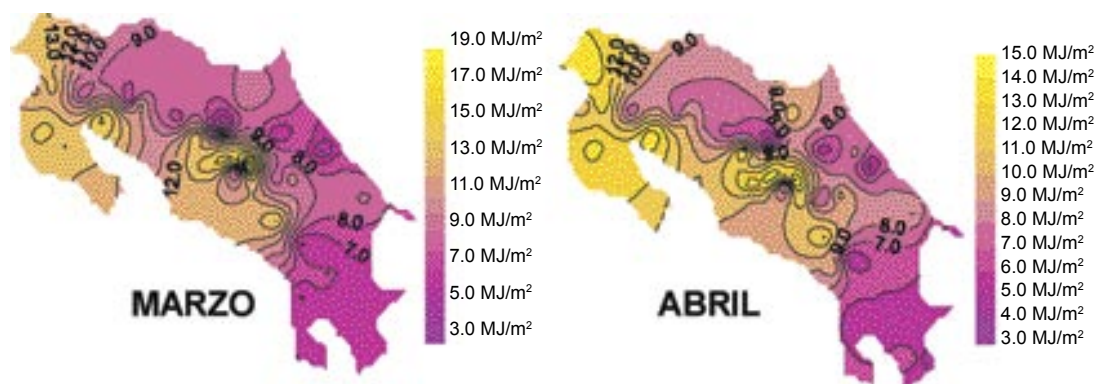


Figura 3. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de marzo y abril.

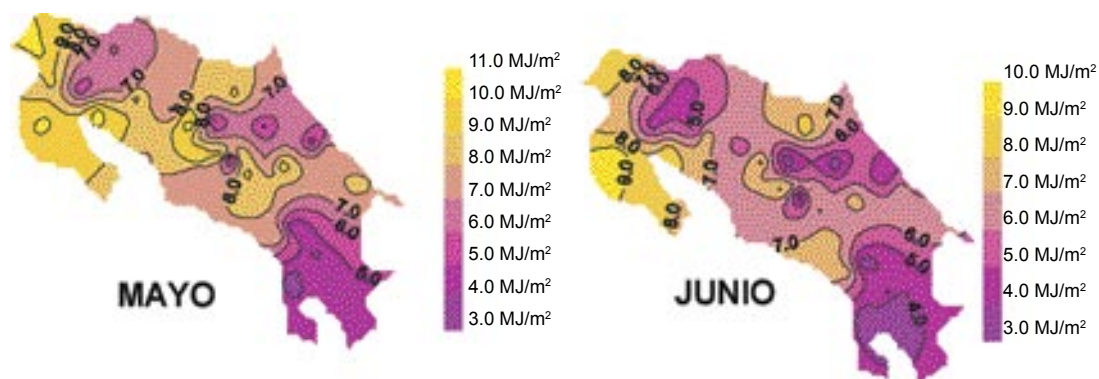


Figura 4. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de mayo y junio.

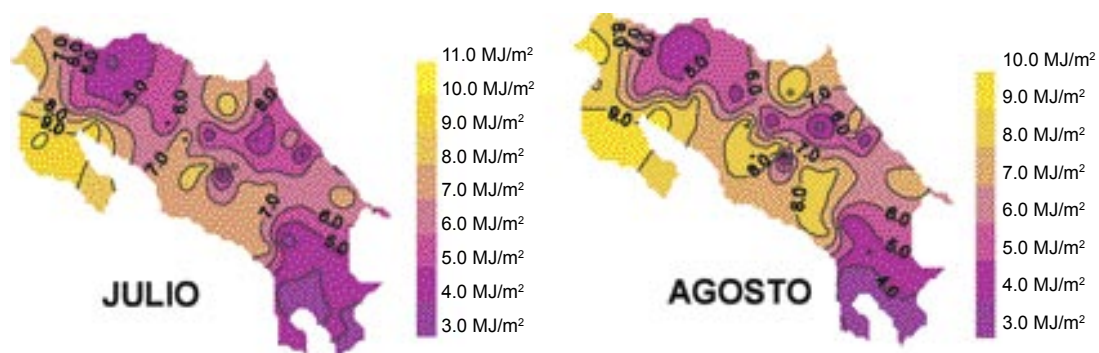


Figura 5. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de julio y agosto.

que la radiación directa comienza a descender con respecto a mayo y junio, como consecuencia de la acentuación de la época lluviosa en el país, asociada a mayor nubosidad y a menor transparencia atmosférica. Los valores más altos del mes de julio se concentran en el Pacífico Norte [Santa Cruz (10.2 MJ/m²)]; mientras los valores más bajos se encuentran en el Pacífico Sur [Exp. Finca 05 (3.4 MJ/m²), Exp. Finca 45 (3.4 MJ/m²) y Cedral (3.4 MJ/m²)]. Los valores más altos del mes de agosto se ubican en el Pacífico Norte [Santa Cruz (9.7 MJ/m²), Taboga (9.5 MJ/m²), Nicoya (9.4 MJ/m²) y Santa Rosa (9.7 MJ/m²)] y en la Zona Norte [La Rebusca (9.4 MJ/m²)]. Mientras que los valores más bajos tienden a establecerse en el Valle Central [Sabanilla (3.2 MJ/m²)]; las llanuras del Caribe [Los Diamantes (3.3 MJ/m²) y La Lola (3.8 MJ/m²)] y en la región del Pacífico Sur [Exp. Finca 05 (3.3 MJ/m²), Exp. Finca 45 (3.3 MJ/m²) y Coto 47 (4.0 MJ/m²)].

La Figura 6 muestra los mapas de contornos de los promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en los meses de setiembre y octubre. Los valores más altos en el mes de setiembre se ubican en el Pacífico Norte [Santa Cruz (9.8 MJ/m²)]; la Zona Norte [La Rebusca (10.2 MJ/m²)] y en la Vertiente del Caribe [Hacienda El Carmen (9.3 MJ/m²)]. Mientras los valores más bajos se ubican en la región del Pacífico Sur [Exp. Finca 05 (3.5 MJ/m²), Exp. Finca 45 (3.5 MJ/m²) y Cedral (3.4 MJ/m²)] y en el Valle Central [Sabanilla (3.2 MJ/m²) y San José (3.6 MJ/m²)]. Los valores más altos del mes de octubre se ubican en el Pacífico Norte [Santa Cruz (9.9 MJ/m²) y Taboga (9.6 MJ/m²)]; la Zona Norte [La Rebusca (10.2 MJ/m²)] y en la sección oeste y montañosa del litoral del Caribe [Turrialba (9.7 MJ/m²)]. Mientras los valores más bajos se ubican en el Valle Central [San José (3.4 MJ/m²) y Sabanilla (3.5 MJ/m²)]; la región del Pacífico Sur [Palmar Sur (3.3 MJ/m²), Cedral (3.7 MJ/m²), La Piñera (3.7 MJ/m²), Exp. Finca 05 (3.0 MJ/m²), Exp. Finca 45 (3.7 MJ/m²) y Coto 47 (3.7 MJ/m²)] y en la Zona Norte [La Fortuna de San Carlos (3.7 MJ/m²)].

La Figura 7 muestra los mapas de contornos de los promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en los meses de noviembre y diciembre. El

patrón de la radiación directa del mes de noviembre se asemeja a los anteriores meses de la época lluviosa; los valores más altos predominantemente se ubican en el Pacífico Norte o Pacífico Seco [Santa Cruz (10.3 MJ/m²), Taboga (9.6 MJ/m²), Santa Rosa (9.4 MJ/m²) y Nicoya (9.0 MJ/m²)] y al oeste del Valle Central [Turrúcares (9.6 MJ/m²)]. Mientras los valores más bajos se establecen en el Valle Central [San José (3.0 MJ/m²) y Sabanilla (3.3 MJ/m²)]; las llanuras del Caribe [La Lola de Siquirres (3.1 MJ/m²), Los Diamantes de Guápiles (3.0 MJ/m²) y Cobal (3.8 MJ/m²)]; el Pacífico Sur [Coto 47 (4.2 MJ/m²), Palmar Sur (3.7 MJ/m²), Exp. Finca 05 (3.5 MJ/m²) y Exp. Finca 45 (3.5 MJ/m²)]; la Zona Norte [Upala (3.7 MJ/m²) y La Fortuna de San Carlos (2.3 MJ/m²)]. El mes de diciembre tiene la peculiaridad que debido a que es de transición entre la época seca y la época lluviosa, eso trae como consecuencia un paulatino aumento en los valores de la radiación directa respecto a los anteriores meses de la época lluviosa. Los valores más altos de la radiación directa están ubicados específicamente en las regiones más altas y, por lo tanto, de menor masa de aire atmosférica—debido a que la trayectoria de los rayos solares directos recorren menor distancia a través de la atmósfera antes de arribar a la superficie terrestre—, entre éstas están el Volcán Irazú (12.5 MJ/m²), Atirro (13.0 MJ/m²), Turrúcares (11.5 MJ/m²) y Cerro de la Muerte (12.2 MJ/m²). Asimismo, durante el mes de diciembre los valores de radiación directa son altos en el Pacífico Norte [Santa Cruz (11.1 MJ/m²) y Taboga (11.2 MJ/m²)]. Mientras los valores más bajos se ubican en la Zona Norte [La Fortuna (2.3 MJ/m²), Upala (3.7 MJ/m²) y Nueva Tronadora (4.0 MJ/m²)]; el Pacífico Sur [Cedral (3.0 MJ/m²) y Terraba (4.6 MJ/m²)] y en las llanuras del Caribe [La Mola (4.1 MJ/m²), La Lola (3.2 MJ/m²) y Cobal (4.1 MJ/m²)].

La Figura 8 muestra el mapa de contornos del promedio diario, medio y anual de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en Costa Rica. Esta figura presenta los valores más altos de la radiación directa en las cimas de las montañas más altas, como el Volcán Irazú (11.6 MJ/m²), el Cerro de la Muerte (10.1 MJ/m²) y Palmira (10.3 MJ/m²); en la sección del Pacífico Norte, como Santa Cruz (11.4 MJ/m²), Santa Rosa (10.2 MJ/m²), Taboga (11.0 MJ/m²) y Liberia (10.1 MJ/m²) y al oeste del Valle Central, como el Aeropuerto Juan

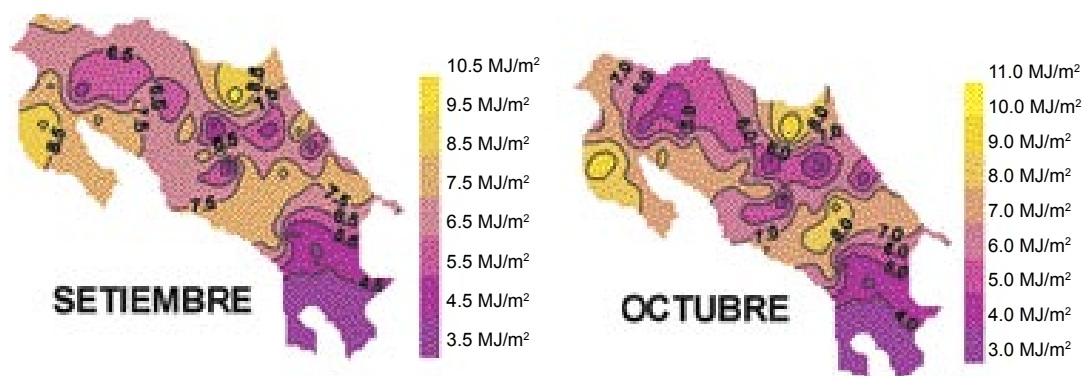


Figura 6. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de septiembre y octubre.

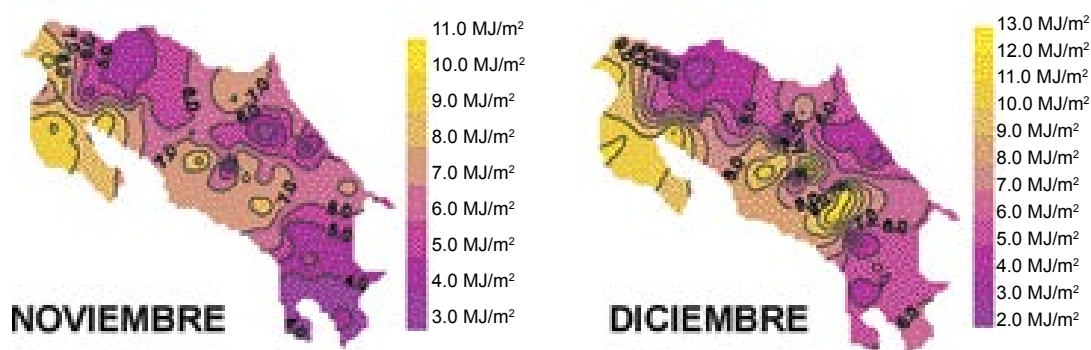


Figura 7. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de noviembre y diciembre.

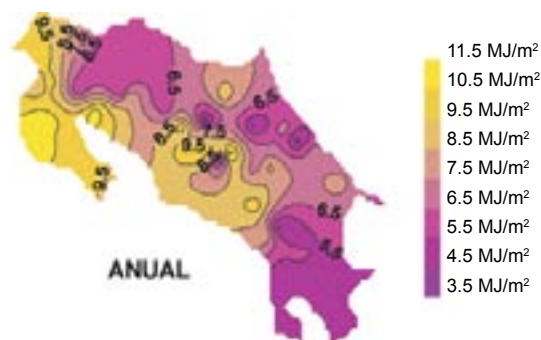


Figura 8. Promedio diario, medio y anual de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal en Costa Rica.

Santamaría (10.0 MJ/m²) y Finca Experimental Fabio Baudrit (10.2 MJ/m²). Mientras los valores más bajos se ubican en las llanuras del Caribe [La Lola (3.9 MJ/m²), Los Diamantes (4.3 MJ/m²) y Cobal (4.9 MJ/m²)]; el Pacífico Sur [Cedral (4.3 MJ/m²), Térraba (4.7 MJ/m²), Palmar Sur (4.6 MJ/m²), Exp. Finca 05 (4.4 MJ/m²) y Exp. Finca 45 (4.9 MJ/m²)]; el Valle Central [Sabanilla (4.5 MJ/m²) y San José (4.7 MJ/m²)] y en la Zona Norte [La Fortuna (3.9 MJ/m²)].

En síntesis puede resumirse que: 1) los datos revelan que los niveles diarios, medios y anuales de la radiación directa en el Pacífico Norte, al oeste del Valle Central y en las estaciones ubicadas en las cimas de las montañas más altas superan los 10.0

MJ/m^2 , siendo el valor más alto registrado de 11.6 MJ/m^2 en el Volcán Irazú (3400 m), 2) los datos también revelan un incremento de hasta un 40% en los valores diarios de la radiación solar directa en los meses más secos (por ejemplo, enero, febrero, marzo y abril), siendo marzo el de mayor promedio ponderado (10.1 MJ/m^2), y 3) los datos también revelan que junio, julio, octubre y noviembre son los meses de menor radiación directa, siendo junio el de menor promedio ponderado (6.1 MJ/m^2).

Los mapas de contornos de las Figuras 9 a 14 muestran la distribución geográfica de la radiación solar difusa, diaria, media y mensual para los doce meses del año en unidades de energía por unidad de área (MJ/m^2). El mapa de contornos de la Figura 15 presenta los valores diarios, medios y anuales de la radiación solar difusa de todo el territorio de Costa Rica. A lo inverso de lo demostrado previamente en los mapas de radiación directa, los valores más altos en los mapas de radiación difusa coinciden con las localidades donde existen mayor nubosidad y precipitación, así como en las laderas de las montañas y en los valles rodeados por montañas que cubren el horizonte, y consecuentemente el número de horas de sol es menor a lo esperado. Los valores diarios, medios y anuales de la radiación difusa (Figura 15) muestran que los valores más altos se concentran en las localidades ubicadas en la Zona Norte [La Fortuna de San Carlos (10.4 MJ/m^2), Muelle de San Carlos (8.9 MJ/m^2), Upala (8.9 MJ/m^2) y Santa Clara (8.9 MJ/m^2)], el Pacífico Sur [Cedral (10.5 MJ/m^2)]; algunas regiones del Valle Central [Pavas

(9.2 MJ/m^2), Puriscal (9.2 MJ/m^2), Universidad Nacional (9.0 MJ/m^2), Santa Lucía (9.1 MJ/m^2), La Margarita (9.4 MJ/m^2) y Aeropuerto Juan Santamaría (9.1 MJ/m^2)] y en la Vertiente del Caribe [Los Diamantes (8.9 MJ/m^2)]. Mientras los valores más bajos se localizan en las cimas de las montañas (donde existen menos obstáculos por el horizonte, mayor transparencia atmosférica, mayor índice de claridad y menor masa de aire atmosférica), como el Volcán Irazú (6.0 MJ/m^2), Palmira (6.7 MJ/m^2), Fraijanes (7.1 MJ/m^2), el Cerro de la Muerte (6.7 MJ/m^2) y Agua Caliente de Cartago (7.0 MJ/m^2).

Del análisis hecho, cabe señalar que los valores más altos de radiación difusa se presentan durante los meses de abril, mayo y agosto, siendo agosto el de mayor promedio ponderado (9.1 MJ/m^2) de las sesenta y dos estaciones analizadas en este trabajo. Es posible que en ciertas localidades, cuando se incrementa la radiación global, también se incrementa la radiación directa y la difusa, porque la radiación global es la suma de ambas componentes. A pesar de que abril es un mes de la época seca, tiene valores altos de radiación directa y difusa, lo que demuestra que la radiación solar global también tiene valores altos.

CONCLUSIONES

A pesar de que este trabajo fue basado en datos con una limitada precisión, ya que no fue posible comprobar experimentalmente las componentes directa y difusa de la radiación solar en la mayoría de las estaciones radiométricas estudiadas;

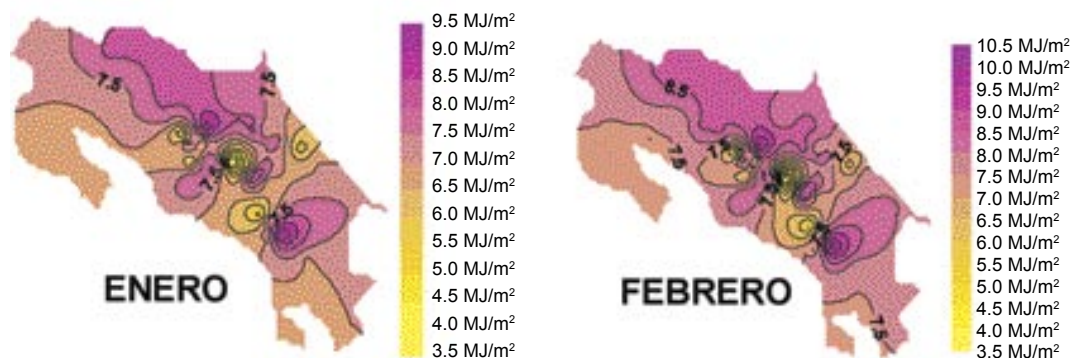


Figura 9. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar difusa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de enero y febrero.

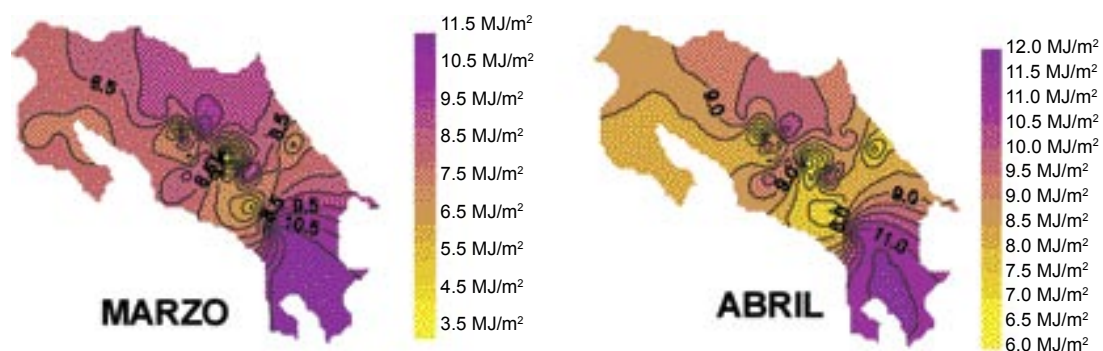


Figura 10. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar difusa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de marzo y abril.

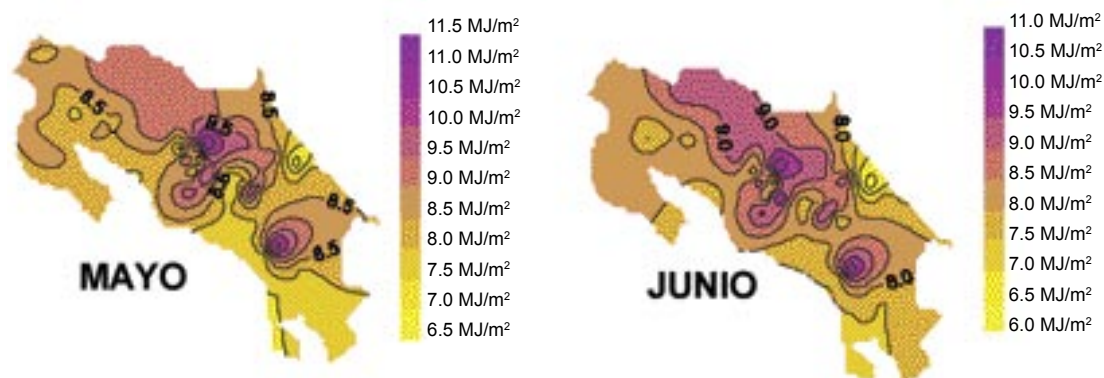


Figura 11. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar difusa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de mayo y junio.

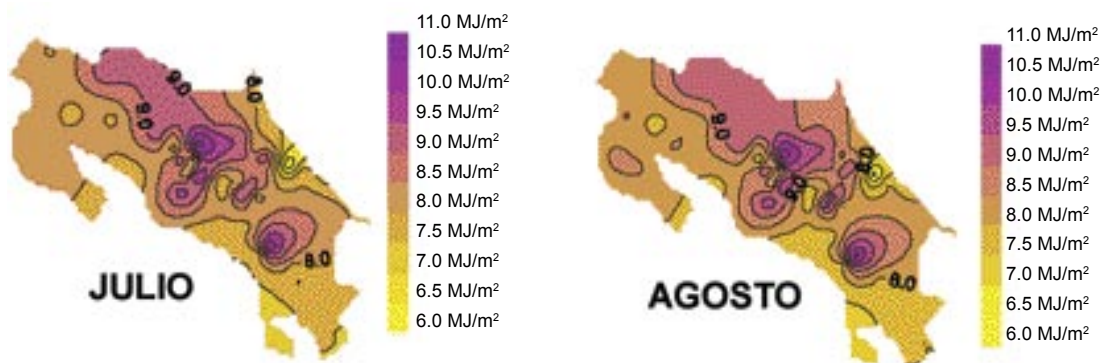


Figura 12. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar difusa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de julio y agosto.

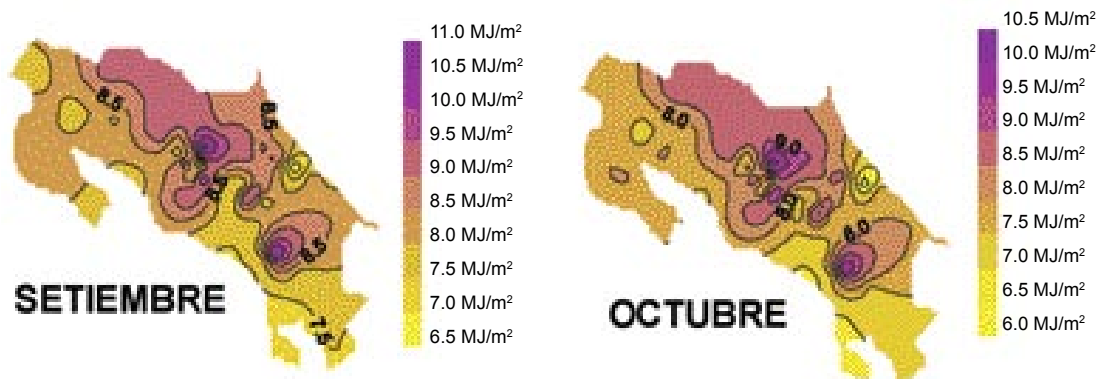


Figura 13. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar difusa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de septiembre y octubre.

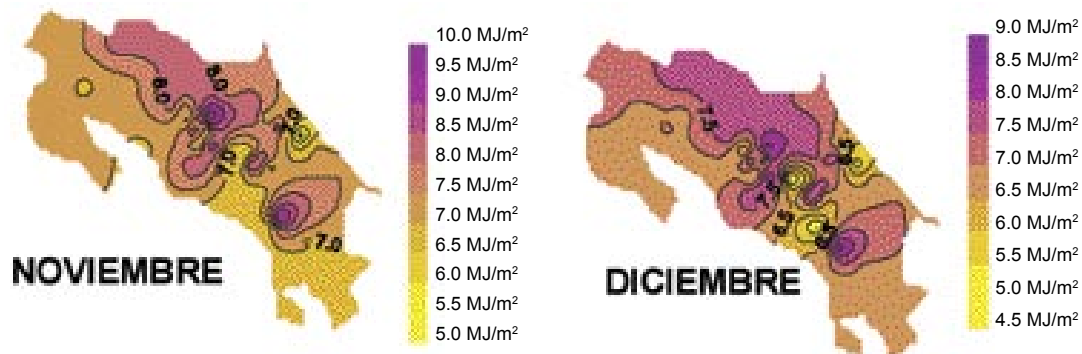


Figura 14. Promedios diarios, medios y mensuales de la radiación solar difusa sobre una superficie horizontal en Costa Rica, en los meses de noviembre y diciembre.

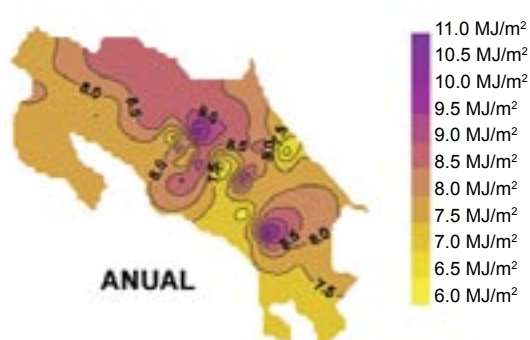


Figura 15. Promedio diario, medio y anual de la radiación solar difusa sobre una superficie horizontal en Costa Rica.

sin embargo, estos datos fueron generados por modelos atmosféricos que previamente demostraron su aplicabilidad en varias regiones del país, los cuales fueron utilizados en el trazado de mapas de la distribución espacial de la radiación solar directa y difusa. Estos primeros mapas revisten más un carácter cualitativo que cuantitativo y están orientados a satisfacer las demandas locales de información formuladas por ingenieros, agrónomos, arquitectos e investigadores interesados en el aprovechamiento de la energía solar; a pesar de la mencionada incerteza en los valores absolutos, pueden ser de gran utilidad en las aplicaciones de esta tecnología en la región.

REFERENCIAS

- Aguiar, J. F. 1999. *Cartografía de la radiación solar por métodos geoestadísticos*, 39 p., Red Iberoamericana de Solarimetría (RISOL).
- Bădescu, V. 1981. "A verification of the atmospheric model proposed by Barbaro et al. for computing direct and diffuse solar radiation". *Solar Energy* 26: 459-460.
- Bădescu, V. 1987. "Can the model proposed by Barbaro et al. be used to compute global solar radiation on the Romanian territory". *Solar Energy* 38: 247-254.
- Barbaro, S., Coppolino, S., Leone, C. and Sinagra, E. 1981. "An atmospheric model for computing direct and diffuse solar radiation". *Solar Energy* 26: 459-460.
- Ciocoiu, I., Elekes, I. and Glodeanu, F. 1974. "Corelatia dintre radiatia globală și durata de strălucire a soarelui, *Cu-legera lucrărilor*". I. M. H. pe anul. 1972: 265-275. Bucurest.
- Cole, R. J. 1976. "Direct solar radiation data as input into mathematical models describing the thermal performance of buildings". *Building and Environment* 2: 173-179, 181-186.
- Creteanu, V. 1984. "Cadastrul energiei solare destinat nevoilor energetice". *St. Cerc. Meteorol.* 33-41. I.M.H. Bucurest.
- Goldberg, B., Klein, W. H. and McCartney, R. D. 1979. "A comparison of some models used to predict solar irradiance on a horizontal surface". *Solar Energy* 23: 81-83.
- Ideriah, F. J. K. 1981. "A model for calculating direct and diffuse solar radiation". *Solar Energy* 26: 447-452.
- Kasten, F. A. 1966. "A new table and approximate formula for relative optical air mass". *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol*, Ser. B14, 206-223.
- Krige, D. 1951. "A statical problem to some basic mining valuation problems of the Witwatersand". *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of the South Africa* 52: 119-139.
- Leckner, B. 1978. "The spectral distribution of solar radiation at the earth surface – elements of a model". *Solar Energy* 20(2): 143-150.
- Liu, B. Y. H. and Jordan, R. C. 1960. "The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total radiation". *Solar Energy* 4(3): 1-19.
- Matheron, G. 1962. "Traite de Geostatistique Appliquée". Tome I. *Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minières*, Vol. 14. Editions Technip, Paris.
- Matheron, G. 1963a. "Traite de Geostatistique Appliquée". Tome II. Le krigeage. *Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minières*, Vol. 24. Editions Bureau de Recherches Geologiques et Minières. Paris.
- Matheron, G. 1963b. "Principies of Geoestatitics". *Economic Geology*, vol. 58: 1246-1266.
- McKay, D. C. 1984. Solar radiation and pyranometry studies for solar energy applications: an overview of IEA text IV, poster form. EC conference on solar Heating April 30 – May 4, 1984, Amsterdam, The Netherlands.
- Neacsu, O. and Susan, V. 1984. "Unele caractéristici ale duratei strălucirii soarelui deasupra teritoriului României, St. Cerc". *Meteorol.* 99-113. I.M.H. Bucurest.
- Wright, J. 1981. *Estimación de la radiación solar en Costa Rica utilizando horas de sol y otros datos meteorológicos*. Tesis calificatoria para el grado de Licenciatura, Universidad de Costa Rica.
- Wright, J. 1988a. "Aplicaciones del modelo atmosférico de Barbaro et al. para la estimación de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica". *Ciencia y Tecnología* 12(1-2): 89-108.
- Wright, J. 1988b. "Estimación de los promedios diarios y mensuales de la radiación difusa sobre un plano horizontal en Alajuela, Costa Rica". *UNICIENCIA* 5(1-2): 39-46.
- Wright, J. 2001. "Correlaciones de la fracción difusa". *Top. Meteor. Oceanog.* 8(1): 15-18.
- Wright, J. 2002. "Mapas de radiación solar en Costa Rica". *Top. Meteor. Oceanog.* 9(2): 79-87.

APÉNDICE

Una breve descripción del modelo *BCLS* se presenta a continuación. La irradiancia directa en un cielo claro I_z (W/m²) depende del ángulo cenital z del sol, la cual puede obtenerse como una función de la masa de aire óptica m , la profundidad del agua precipitable w (mm de H₂O) y el contenido de polvo en la atmósfera d (partículas/cm³), por la relación de Cole (1976):

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

En la ecuación (A.1): I_e (W/m²) es la irradiancia solar extraterrestre y los coeficientes a_i, b_i ($i = 1, 2, 3$) tienen los siguientes valores:

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

La irradiancia directa transmitida en la ausencia de la dispersión es calculada como:

$$I_{z0} = I_e [0.98 \exp(-0.0154 \pi \mu) + 0.004(\pi \mu)^2 - 1.1086 \times 10^{-5}(\pi \mu)^3 + (121.948(1 + \pi \mu)) \ln(1 + 10(\pi \mu)^6)] \quad (A.2)$$

La radiación difusa para condiciones de cielos claros D_z (W/m²) es dada por:

$$D_z = 0.5 \cos^2 z (I_{z0} - I_z) \quad (A.3)$$

Por integración de los valores instantáneos desde la salida hasta la puesta del sol los valores diarios de la irradiancia difusa y directa (I_e y D_e), respectivamente, son obtenidos por:

$$I_e = \int_{t_1}^{t_2} I_z \cos z \, dt \quad (A.4)$$

$$I_u = s/S I_e \quad (A.5)$$

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

La radiación directa y difusa en condiciones de cielos nublados (I_n y D_n), dependen respectivamente, de la heliofania relativa s/S , la cual es el cociente entre el número de horas de sol reales s y el número de horas de sol posibles S . Se obtienen por:

$$I_u = s/S I_e \quad (A.6)$$

$$D_u = s/S D_e + k^* (1 - s/S) (I_e + D_e) \quad (A.7)$$

En la ecuación (A.7): k^* es el coeficiente de Berland, tabulado por Barbaro *et al.* (1981) para varias latitudes.

El valor de la radiación global G en un cielo nublado es dado por:

$$G = I_u + D_u \quad (A.8)$$

Para tomar en cuenta las reflexiones múltiples de la radiación solar entre la superficie de la tierra y la atmósfera, se utilizó el albedo del suelo a , entonces, la irradiancia solar global corregida por el albedo, G^* , es:

$$G' = \frac{G}{1 - a[0.2 + 0.5(1 - s)S]} \quad (\text{A.9})$$

El grueso de la capa del agua precipitable fue estimado por la fórmula de Leckner (1978)

$$w = \frac{0.493 H_r p_s}{T} \quad (\text{A.10})$$

Donde H_r es la humedad relativa en fracciones de uno, T es la temperatura ambiente en grados kelvin y p_s es la presión parcial del vapor de agua del aire saturado y calculado por la siguiente ecuación:

$$p_s = \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (\text{A.11})$$

La corrección de la presión y temperatura no es necesaria en la ecuación (A.10) porque ya está incluida en su constante numérica.

La masa de aire óptica m fue calculada como:

$$m = \frac{p}{p_0} m_s \quad (\text{A.12})$$

Donde p_0 y p representan, respectivamente, la presión estándar y la presión actual en el suelo. m_s es la masa de aire estándar (Kasten, 1966) y se escribe como sigue:

$$m_s = \left[\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.25} \right]^{-1} \quad (\text{A.13})$$

θ_z es el ángulo cenital del lugar, en grados, el cual se obtiene de la siguiente forma:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \operatorname{sen} h \quad (\text{A.14})$$

h es la altitud solar, altura solar o elevación solar, en grados; $h = 90 - \theta_z$;

ω es el ángulo horario solar, cero al mediodía y mañana positivo;

ϕ es la latitud geográfica, en grados, norte positivo;

δ es la declinación, es la posición angular del Sol al mediodía solar con respecto al plano del ecuador, norte positivo, en grados.