

Modelación del flujo de radiación solar global incidente sobre la superficie terrestre, para condiciones de cielo despejado

Modeling of flux of incident global solar radiation on the terrestrial surface, for clear-sky conditions

Lic. Yosdany González Jaime | yosdany.gonzalez@insmet.cu | Centro de Contaminación y Química Atmosférica, (INSMET)

MSc. Diego Rafael Ulloa López | diego@instec.cu | Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC)

Lic. Ismelis Iglesias Núñez | ismelis@instec.cu | Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC)

Recibido: 18 de diciembre, 2012; aceptado: 9 de mayo, 2013. pp. 44 – 56.

Resumen

El Sol es la principal fuente de energía para la mayoría de los procesos y fenómenos que ocurren en el planeta Tierra. Los cambios sistemáticos que experimenta la energía solar recibida en diversos lugares y en distintas épocas influyen, decisivamente, en las condiciones climáticas de una región. Esta razón justifica los estudios para estimar la radiación solar en zonas donde no existen mediciones actinométricas. El objetivo de este trabajo es obtener un modelo para calcular la distribución cartográfica de la radiación global que incide sobre la superficie terrestre. Para ello, se consideraron los procesos de extinción de la radiación solar que ocurren en la atmósfera, sin tener en cuenta el efecto de la nubosidad. Se calcularon los valores de radiación global para cada minuto del día y en todos los puntos de una rejilla que representa el área seleccionada, considerando la influencia de las variaciones del relieve en la distribución espacial de la radiación. Los flujos diarios se obtuvieron sumando los valores calculados para cada minuto del día y, finalmente, se confeccionaron los mapas con los promedios de la radiación global diaria para cada mes durante el año. Como resultado, se obtuvo un modelo implementado en una aplicación de software. A modo de comprobación se aplicó el modelo para determinar la distribución espacial de la radiación

global en la zona de Casablanca; la validación se realizó con las mediciones de la estación automática de Casablanca y se obtuvieron correlaciones significativas entre los valores medidos y los estimados.

PALABRAS CLAVES: Modelo, mediciones actinométricas, estimación, radiación solar, relieve.

Abstract

The Sun is the main source of energy for the majority of phenomena and processes taking place in our planet. Systematic changes of solar energy received at different ages on different regions, have a decisive influence on their climatic conditions. This reason justifies studies to estimate solar radiation in areas where there are not actinometric measurements. The objective of this work is to obtain of a model to calculate the cartographic distribution of the global radiation that affects on the terrestrial surface. They considered the process of extinction of the solar radiation that occur in the atmosphere, regardless of the effect of cloudiness in the model. Calculate the values of global radiation for each minute of the day, point of a grid corresponding to the area selected, to intervals of a, considering the influence of the variations of the relief in the spatial distribution of the radiation. The solar daily flux was obtained as the sum of the all values calculated for each minute of the day.

Finally, the maps show the average daily global solar radiation for each month and for the year. As a result a model implemented in an application of software was obtained. The model to determine the space distribution of the global radiation at Casablanca's zone was applicable like example. Validation was done with the measurements of Casablanca's automatic station, obtaining significant correlations between the values measured and estimated.

KEYWORDS: Model, actinometric measurements, calculated, solar radiation, relief.

Introducción

Hoy día, el esquema de consumo energético a nivel mundial no es sustentable, tanto por razones de escasez de combustibles fósiles, como ecológicas a causa de las afectaciones sobre el medio ambiente. Para cualquier esquema de desarrollo sostenible es indispensable que la mayoría de los recursos, en especial la energía, sean renovables. El Sol, como principal fuente de energía renovable, constituye una alternativa energética totalmente ecológica. El desarrollo alcanzado en los últimos años en la obtención de electricidad por medio de paneles solares, ha colocado a la energía solar en un lugar de honor entre las energías renovables. La estimación de la radiación solar en zonas donde no existen mediciones actinométricas, constituye una alternativa para estudios sobre la energía renovable, el microclima, los temas agrarios y el aprovechamiento de la energía solar con diferentes fines.

Dada la escasez de información actinométrica, de manera general, en numerosas regiones del mundo, principalmente en las zonas montañosas, muchos investigadores han establecido formulaciones sencillas con una base empírica o teórica para estimar la radiación solar, como es el caso de Angström (1924) y Glover y Mac Culloch (1959), entre otros. Wright (1981), en Costa Rica, hizo un estudio comparativo

entre varias ecuaciones empíricas con miras a la estimación de los valores diarios medios mensuales de la radiación solar global en una superficie horizontal. Posteriormente, Wright (2002), obtuvo mapas promedios diarios medios mensuales de la radiación solar global en Costa Rica, interpolando mediante la técnica Kriging los datos de la radiación solar global obtenidos por Wright (1981). Asimismo, diversos autores han incluido en sus trabajos la influencia que provoca el relieve en la distribución de la radiación solar en la superficie terrestre; para ello, utilizan el Modelo Digital de Elevación (MDE) como representación del relieve, por ejemplo, Hofierka y Sári (2002), quienes implementaron un modelo para el cálculo de la radiación solar en el Sistema de Información Geográfica GRASS GIS, a partir de un MDE. Más adelante, otros autores también han considerado las diferencias del relieve por medio de un MDE en las estimaciones de la radiación solar, cabe citar los casos de Gómez-Tagle y Chávez (2004), Pons y Ninyerola (2008) y Montero *et al.* (2009).

En Cuba, después de la instalación de la red actinométrica en la década de los setentas del siglo xx, comenzó a obtenerse valores medidos de los flujos de radiación solar que representaron la información básica para la ejecución de los trabajos de climatología solar. En este sentido, Vigón (1985) realizó un análisis físico-geográfico de la radiación solar global y como resultado de esta investigación se obtuvo la primera versión de los mapas solarimétricos del territorio cubano, teniendo en cuenta, además de los datos de estas estaciones actinométricas, los valores de insolación (horas con brillo solar) registrados en las estaciones heliográficas de la Red Meteorológica Nacional.

Borrajero *et al.* (2004), a partir de la digitalización de las cartas heliográficas, consiguieron valores de los distintos flujos de radiación solar para cada estación heliográfica, considerando inclinaciones y orientaciones notables; para ello, fueron elaborados ficheros con la digitalización de las cartas heliográficas.

ficas y, posteriormente, se calculó la irradiación de cada día realizando los ajustes necesarios en dependencia de la altura del Sol. Una vez calculados estos valores para los distintos flujos de radiación en cada estación heliográfica, se efectuó la interpolación para, finalmente, obtener los mapas mensuales y anuales de radiación solar global sobre superficies horizontales, así como los de superficies verticales orientadas al este, el sur y el oeste e inclinadas 45° al sur. Las versiones anteriores de los mapas de radiación que se obtuvieron en el *Atlas climático de Cuba*, Lecha (1994) fueron elaboradas sobre la base de métodos menos precisos de estimación, a la vez que la cartografía fue realizada manualmente, por lo que los mapas obtenidos en este trabajo constituyen un avance en la representación cartográfica de la radiación solar.

En nuestro país, actualmente, a pesar de los resultados expuestos, resulta difícil obtener una cartografía de la radiación solar a una escala detallada en que se considere la influencia del relieve en la distribución espacial de la radiación solar, a causa de, entre otros factores, la escasez de mediciones actinométricas. Por ello, el objetivo central de este trabajo es modelar la distribución cartográfica de la radiación solar global incidente sobre el relieve de sectores de la superficie terrestre pequeños para condiciones de cielo despejado.

Materiales y métodos

Los valores de radiación solar que caracterizan una región determinada son el resultado de la interacción de un conjunto de factores que pueden clasificarse en dos grupos: a) meteorológicos, y b) astronómicos y geométricos.

Factores meteorológicos

Una vez que la radiación solar se adentra en la atmósfera, todos sus componentes atenúan esta radiación en mayor o menor medida. La intensidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre está men-

guada por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera terrestre, como son los siguientes:

1. Absorción selectiva por los gases y el vapor de agua de la atmósfera.
2. Dispersión molecular (de Rayleigh).
3. Dispersión y absorción por aerosoles o turbidez.

La absorción de la radiación solar por los gases presentes en la atmósfera ocurre cuando la energía proveniente del Sol se transforma en movimiento molecular interno, que produce un aumento en la temperatura de estos gases; en este sentido, los gases que más absorben la radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera. La absorción es selectiva, o sea, diversos gases absorben la radiación solar en las diferentes longitudes de onda del espectro y en distinto grado. El nitrógeno absorbe, únicamente, la radiación de longitudes de onda muy pequeñas de la parte ultravioleta del espectro, región en la cual se encuentra una fracción pequeña de la energía radiante del Sol, por lo cual la absorción del nitrógeno casi no influye en la atenuación de la radiación solar. El oxígeno, aunque absorbe en dos franjas estrechas de la región visible del espectro y en su parte ultravioleta, lo hace en proporciones muy pequeñas. El ozono constituye un absorbente total de la radiación ultravioleta, con $\lambda < 0.29 \mu\text{m}$. En la parte infrarroja del espectro, la radiación solar es absorbida intensivamente por el gas carbónico. El vapor de agua que se concentra sobre todo en la troposfera baja, es el absorbente principal de los rayos infrarrojos; las nubes, los aerosoles y partículas sólidas en suspensión en la atmósfera, también absorben la radiación solar.

La dispersión es un proceso físicamente distinto de la absorción, puesto que no se transforma la energía, sino que se cambia la dirección de una parte del haz incidente y resulta en una disminución de la intensidad de la radiación en la dirección original. La

radiación solar en las diferentes longitudes de onda del espectro es dispersada de manera diferente. Para que ocurra la dispersión se necesita un medio ópticamente heterogéneo, es decir, donde el índice de refracción varíe punto a punto. El aire, tanto puro, como con impurezas, es este medio. La dispersión puede ser provocada por moléculas gaseosas u otras partículas presentes en la atmósfera (polvo atmosférico, gotas de nube o niebla, cristales de hielo, humos, aerosoles) y es directamente proporcional al contenido de aerosoles en el aire.

Según la Ley de Rayleigh, en el aire puro (atmósfera de Rayleigh), donde solo las moléculas de gases (cuyas dimensiones son más de diez veces menores que las longitudes de onda de la radiación solar) provocan la dispersión, esta es inversamente proporcional al cuarto grado de la longitud de onda de los rayos dispersados; por ello, se infiere que existe una mayor dispersión mientras menor sea la longitud de onda. Cuando existen partículas con un tamaño semejante al de las longitudes de onda de la radiación solar, ocurre la dispersión de Mie, que afecta las longitudes de ondas mayores a las que son dispersadas según la Ley de Rayleigh y se presenta, fundamentalmente, en las capas bajas de la atmósfera, donde abundan estas partículas grandes. Asimismo, ocurre dispersión no selectiva cuando las partículas son mucho más grandes que las longitudes de onda de la radiación solar; se denomina no selectiva porque dispersa todas las longitudes de onda por igual.

La disminución de la radiación en la atmósfera mediante la absorción y la dispersión depende de varios factores: la longitud de onda de la luz, la longitud del recorrido de la radiación en la atmósfera y la densidad de átomos, moléculas o partículas que encuentra en su camino. La densidad de una sustancia multiplicada por la longitud recorrida se denomina *masa óptica*.

Otro fenómeno que atenúa la radiación solar que incide sobre la atmósfera del planeta ocurre cuando

se refleja la radiación solar incidente sobre una superficie, y el carácter de la superficie determina la cantidad de la radiación que es capaz de reflejar. La relación entre la radiación reflejada y la cantidad total de radiación incidente sobre la superficie de la tierra o cualquier otra superficie se denomina albedo. Cuando se refleja toda la radiación incidente, el albedo toma valor uno (1), mientras que cuando se absorbe toda esta radiación, toma valor cero (0). Las nubes alcanzan altos valores de albedo y, por ende, pueden reflejar una parte significativa de la radiación que incide sobre estas.

Factores astronómicos y geométricos

La *constante solar* se define como la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos del Sol y a la distancia media entre el Sol y la Tierra (R_0). Como la Tierra se mueve por una elipse de excentricidad muy pequeña, la distancia real entre el Sol y la Tierra (R) varía en un rango de $\pm 1.7\%$ con respecto a la distancia media entre el Sol y la Tierra provocando con ello una variación en la intensidad de la radiación solar fuera de la atmósfera de aproximadamente $\pm 3.3\%$, según Scharmer y Greif (2000).

El valor de la intensidad de la radiación solar que incide sobre una superficie perpendicular a los rayos solares fuera de la atmósfera, calculado para cada día del año a la distancia real entre el Sol y la Tierra (G_0) puede obtenerse mediante la formulación siguiente (Scharmer y Greif, 2000):

$$G_0 = I_0 * \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \quad (1)$$

Donde $I_0 = (13677) \text{ W/m}^2$ es el valor de la constante solar.

Simultáneamente al movimiento de traslación, nuestro planeta gira en un movimiento de rotación so-

bre un eje que pasa por los polos; el plano normal al eje de rotación que pasa por el centro de masa de la Tierra se denomina plano ecuatorial o plano del ecuador y el ángulo que forman los rayos solares con respecto al plano ecuatorial se define como la declinación solar (δ).

La posición del Sol está determinada por la altura del Sol sobre el horizonte (h_0) y el acimut (A); la altura del Sol es el ángulo que forman los rayos solares con el plano horizontal; el acimut es el ángulo determinado por la proyección del vector solar (vector unitario que permanentemente se encuentra dirigido hacia el Sol) sobre el plano horizontal y la dirección sur. Se miden en la dirección de la rotación diaria de la esfera celeste, es decir, hacia el occidente del punto sur, desde 0° hasta 360° .

Una vez definida la posición del Sol, es posible determinar el ángulo de incidencia (i) de los rayos solares en relación con cualquier superficie inclinada, como el ángulo medido entre el haz de luz y la superficie inclinada. De esta forma, puede considerarse la influencia del relieve en la distribución espacial de la radiación solar que, a menudo, no se tiene en cuenta en la representación cartográfica.

Radiación global teórica

En la elaboración del modelo se emplean leyes físicas y formulaciones matemáticas que representan los diferentes procesos modificadores de la radiación solar hasta llegar a la superficie terrestre. Para calcular la radiación global teórica incidente se dividió el flujo en radiación directa y radiación difusa.

Radiación directa

Con miras a calcular el flujo de radiación directa para cielo despejado se utiliza la Ley de Beer:

$$I = G_0 \tau^m \quad (2)$$

Donde τ es el factor de transparencia de la atmósfera y m es masa óptica relativa de la atmósfera, defi-

nida como la razón entre la masa óptica del recorrido de la radiación directa y la masa óptica del recorrido vertical en la dirección cenital. Si se considera el proceso de transmitancia como lo hacen Rigollier *et al.* (2000), se tiene lo siguiente:

$$\tau^m = e^{(-0.8662 T_{LK} m \delta_R)} \quad (3)$$

En la ecuación [3], T_{LK} es el factor de turbidez de Linke normalizado para una masa de aire 2 (Kasten, 1996). El factor de turbidez indica el número de atmósferas ideales que tiene que atravesar la radiación solar para que le ocurra un debilitamiento igual al que produce la atmósfera real. Su valor, por lo general, oscila entre 2 y 7, en dependencia de las condiciones atmosféricas, aunque puede alcanzar valores superiores. El espesor óptico de Rayleigh (δ_R) es una medida de la opacidad de una atmósfera seca y limpia (atmósfera de Rayleigh) causada por la absorción y la dispersión que en ella ocurre; es una magnitud adimensional que puede calcularse mediante la fórmula mejorada de Kasten (1996):

Para $m \leq 20$:

$$\delta_R = 1 / (6.6296 + 1.7513m - 0.1202m^2 + 0.0065m^3 - 0.00013m^4) \quad (4)$$

Para $m > 20$:

$$\delta_R = 1 / (10.4 + 0.718m) \quad (5)$$

La masa óptica relativa de la atmósfera (m) en función de la altura del lugar y la altura del Sol se obtiene por medio de la fórmula de Kasten y Young (1989):

$$m = \frac{p}{p_0} \left(\frac{1}{\sin(h_0^{ref}) + 0.50572(h_0^{ref} + 6.07995)^{-1.6364}} \right) \quad (6)$$

Donde h_0^{ref} es la corrección de la altura solar por la componente de refracción atmosférica, calculada como aparece en Hofierka y Sári (2002):

$$Dh_0^{ref} = 0.061359 \left(\frac{0.1594 + 1.123h + 0.065656h^2}{1 + 28.9344h + 277.3971h^2} \right) \quad (7)$$

$$h_0^{ref} = h_0 + Dh_0^{ref} \quad (8)$$

El factor $\frac{p}{p_0}$ es una corrección que está determinada por altura z (expresada en *metros*), donde p es la presión a esa altura y p_0 es la presión en superficie, y puede calcularse del modo siguiente:

$$\frac{p}{p_0} = e^{(-z/843.5)} \quad (9)$$

Finalmente, el flujo de radiación directa que incide sobre una superficie horizontal, se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$S = G_0 [e^{(-0.8662 T_{LK} m \delta_0)}] \text{sen}(h_0) \quad (10)$$

Mientras que la radiación directa que incide sobre superficies inclinadas, puede calcularse con la expresión siguiente:

$$S = G_0 [e^{(-0.8662 T_{LK} m \delta_0)}] \text{sen}(i) \quad (11)$$

En la ecuación [11] el ángulo de incidencia de los rayos del Sol con respecto a una superficie de pendiente y acimut se calcula como aparece en Montero (2009):

$$\text{sen}(i) = \cos(\varphi') \cos(\delta) \cos(T - \lambda') + \text{sen}(\varphi') \text{sen}(\delta) \quad (12)$$

Donde:

$$\text{sen}(\varphi') = -\cos(\varphi) \text{sen}(\gamma_N) \cos(A_N) + \text{sen}(\varphi) \cos(\gamma_N) \quad (13)$$

$$\tan(\lambda') = -\frac{\text{sen}(\gamma_N) \text{sen}(A_N)}{\text{sen}(\varphi) \text{sen}(\gamma_N) \cos(A_N) + \cos(\varphi) \cos(\gamma_N)} \quad (14)$$

Donde (φ) es la latitud en *grados decimales* y (T) es el ángulo horario, es decir, el desplazamiento angular del Sol, al este o al oeste del meridiano local causado por la rotación de la Tierra; es negativo por la

mañana, positivo por la tarde y al mediodía solar, es por definición, cero. Puede calcularse sobre la base de la hora solar (t) expresada en hora decimal de 0 a 24, mediante la ecuación siguiente (Montero, 2009):

$$T = \frac{\pi}{12} (t - 12) \quad (15)$$

Para nuestro trabajo se escogieron los promedios mensuales del factor de turbidez de Linke que obtuvieron Martínez *et al.* (1988) a partir de mediciones realizadas en la estación de Casablanca entre 1977 y 1985. En la tabla 1 pueden observarse estos valores; se evidencia una tendencia al aumento en los meses de verano dada la convección por el calentamiento, lo cual provoca la incorporación de cantidades considerables de vapor de agua y polvo a la atmósfera, Martínez *et al.* (1988). Para poder aplicar el método, se normalizaron estos valores de turbidez de Linke para una masa de aire relativa igual a 2 (Remund *et al.*, 2003).

TABLA 1

Promedios mensuales del factor de turbidez de Linke en la estación de Casablanca, Martínez *et al.* (1988)

Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
3.8	4.2	4.3	4.8	5.2	5.5	5.3	5.0	4.9	4.5	4.0	3.7

Radiación difusa

La estimación de la componente difusa en una superficie horizontal se hace como el producto de la intensidad de la radiación solar (G_0) que incide sobre una superficie perpendicular a los rayos solares fuera de la atmósfera; una función de transmisión (T_n) dependiente solo del factor de turbidez de Linke (T_{LK}) y una función de altura solar (F_d) dependiente solo de la altura solar (h) (Scharmer y Greif, 2000):

$$D = G_0 T_n F_d \quad (16)$$

La función de altura solar es evaluada mediante la expresión siguiente:

$$F_d = A_1 + A_2 \sin(h) + A_3 \sin^2(h) \quad (17)$$

Donde los valores de los coeficientes A_1 , A_2 , A_3 , y dependen solamente del factor de turbidez de Linke:

$$\begin{aligned} A_1 &= 0.26463 - 0.061581T_{LK} + 0.0031408T_{LK}^2 \\ A_1 &= A'_1 \quad \text{si} \quad A_1 T_n \geq 0.0022 \\ A_1 &= \frac{0.0022}{T_n} \quad \text{si} \quad A_1 T_n < 0.0022 \\ A_2 &= 2.04020 + 0.018945T_{LK} - 0.011161T_{LK}^2 \\ A_3 &= -1.3025 + 0.039231T_{LK} + 0.0085079T_{LK}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Para cielo muy claro, la función de transmisión difusa presenta valores muy bajos; a medida que aumenta la turbidez, la transmitancia difusa aumenta en tanto disminuye la transmitancia directa. Por lo general, la función de transmisión (T_n) varía entre 0.05, para una atmósfera limpia ($T_{LK}=2$), y 0.22, para una atmósfera turbia ($T_{LK}=7$). Puede calcularse de la manera siguiente:

$$T_n = -0.015843 + 0.030543T_{LK} + 0.0003797T_{LK}^2 \quad (19)$$

Para estimar la radiación difusa en una superficie inclinada se distingue entre superficies expuestas y no expuestas a la incidencia de los rayos solares. Las ecuaciones que se utilizan son extraídas de Muneer (1990):

a) Para superficies expuestas a los rayos solares.

$$\text{Si } h_0 \geq 5.7^\circ \quad D_i = D \left[F_\beta (1 - k_b) + k_b \left(\frac{\cos(i)}{\sin(h)} \right) \right] \quad (20)$$

$$\text{Si } h_0 < 5.7^\circ \quad D_i = D \left[F_\beta (1 - k_b) = \left(\frac{k_b \sin(\beta) \cos(A_{LN})}{0.1 - 0.008h} \right) \right] \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{Donde } A_{LN}^* &= A - A_N \\ -\pi &\leq A_{LN}^* \leq \pi & A_{LN}^* > \pi & A_{LN}^* < -\pi \\ A_{LN} &= A_{LN}^* & A_{LN} &= A_{LN}^* - 2\pi & A_{LN} &= A_{LN}^* + 2\pi \end{aligned} \quad (22)$$

b) Para superficies no expuestas a los rayos solares.

$$D_i = DF_\beta \quad (23)$$

Donde F_β es una función que expresa la radiación difusa en dependencia de la inclinación de la superficie y puede calcularse mediante la expresión siguiente:

$$F_\beta = ri(\beta) + \left[\sin(\beta) - (\beta) \cos(\beta) - \pi \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] N \quad (24)$$

En la ecuación [24], $ri(\beta)$ representa la proporción de bóveda celeste vista por la superficie inclinada con respecto a la que ve un plano horizontal:

$$ri(\beta) = \frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \quad (25)$$

El valor de N para superficies en sombra es 0.25. Para superficies iluminadas por el Sol bajo condiciones de cielo despejado, el término N se calcula por medio de la expresión siguiente:

$$N = 0.00263 - 0.712K_b - 0.6883K_b^2 \quad (26)$$

Donde K_b , es la proporción entre la intensidad de la radiación solar directa incidente sobre una superficie horizontal, en la superficie terrestre y fuera de la atmósfera.

Una vez calculados los flujos de radiación directa y difusa, se suman y se obtiene la radiación global para superficies de cualquier inclinación:

$$G = S + D_i \quad (27)$$

Es preciso señalar que las ecuaciones que describen la atenuación de la radiación solar en la atmósfera no tienen en cuenta el efecto que puede provocar la nubosidad, lo cual implica que su aplicación está restringida al cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo despejado. Además, en el monto total de energía solar recibida por cualquier superficie no se considera la radiación que pudieran reflejar las superficies vecinas.

Análisis topográfico

La estimación de la radiación solar incidente tiene una fuerte componente espacial, obviada en la mayoría de los casos que no tienen en cuenta el relieve. Los modelos digitales de elevación (MDE) son de suma utilidad para obtener información básica sobre la morfología de la superficie terrestre. La pendiente del terreno, así como su orientación, son produc-

tos que pueden derivarse del análisis de estos MDE. Para determinar el ángulo de incidencia de los rayos solares con respecto a una superficie cualquiera, es necesario conocer, además de la posición del Sol, la pendiente del lugar y el ángulo acimutal de la normal a la superficie expuesta. Estos atributos topográficos se determinan localmente a partir de las derivadas parciales de las cotas altimétricas (z) de la superficie terrestre; estas derivadas fueron estimadas con el método de las diferencias finitas centradas. Para calcular el ángulo de la pendiente se utilizó la ecuación siguiente (Gallant y Wilson, 1996):

$$\beta = \arctan(s) \quad (28)$$

Donde s , en un punto, es la magnitud del gradiente en ese punto y se calcula del modo siguiente:

$$s = P^{1/2} \quad (29)$$

$$P = z_x^2 + z_y^2 \quad (30)$$

$$z_x = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_E - z_W}{2h} \quad (31)$$

$$z_y = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z_N - z_S}{2h} \quad (32)$$

En las ecuaciones [31] y [32], z_x , z_y son las derivadas parciales de la altura con respecto a x e y en cada caso, mientras que h es la resolución espacial del MDE. El cálculo del acimut de la normal a la superficie fue determinado, también según Gallant y Wilson (1996), mediante la expresión siguiente:

$$A_N = 180^\circ - \arctan\left(\frac{z_y}{z_x}\right) + 90^\circ \left(\frac{z_x}{|z_x|}\right) \quad (33)$$

Estos valores de acimut se miden en *grados* desde el norte, en sentido horario, por lo cual es necesario restarle 180° para que coincida con el mismo sistema de referencia de los valores de acimut solar, que son medidos desde el sur, igualmente, en sentido horario.

Implementación en software

Para la implementación del modelo se empleó el programa GNU Octave, en su versión 3.2.3, que al poseer licencia pública general de GNU, puede utilizarse libremente. Es un programa capaz de interpretar lenguaje de programación Octave y resulta de alto nivel para realizar cálculos numéricos. La implementación en software del modelo incluye el programa principal *RAD_SOL* y los subprogramas *Tconv*, *Solposition*, *Relieve*, *R_inst*.

Tconv es el módulo que hace conversiones de tiempo civil a tiempo solar para llevar a cabo otros subprogramas; *Solposition* permitió obtener, para cada minuto de cada día del año, la posición del Sol; *Rad_inst* necesita como variables de entrada T_{LK} , día, mes, hora y minutos para determinar los flujos de radiación directa y difusa incidente en cada punto del MDE, teniendo en cuenta la topografía, para lo cual incorpora el módulo *Relieve*, que se encarga de hacer los cálculos de la pendiente y la orientación de la pendiente. Finalmente, se suman ambos flujos obtenidos para obtener la radiación global que incide sobre las diferentes superficies representadas por cada punto del MDE en un instante específico. Desde el programa principal *RAD_SOL* se realiza el cálculo de la radiación global, iterando el subprograma *Rad_inst* para cada minuto de cada día del año y, de este modo, obtener los flujos de radiación diarios. También puede calcularse el promedio del flujo de radiación global diario para todos los meses y el año.

Validación del modelo

El modelo se aplicó en un área de estudio comprendida entre las coordenadas planas rectangulares (*Proyección cónica conforme de Lambert, Cuba Norte*): $X_1 = 361075$; $X_2 = 364800$; $Y_1 = 368400$; $Y_2 = 371025$, correspondientes a la zona de Casablanca, en el municipio de Regla. La superficie terrestre de esta zona fue representada por el Modelo Digital de Elevación (MDE) que aparece en la figura 1. Para la obtención

de este MDE se partió de la Hoja 3785-III-b “La Habana”, confeccionada por la empresa GEOCUBA (1ra. ed., 2000), en cuya elaboración se utilizaron métodos digitales con materiales a escala 1/25 000 de 1985, con curvas de nivel a intervalos de 5 m, considerando el nivel cero en el mareógrafo de Siboney, por lo que se corresponde con el sistema de alturas Siboney. Con miras a la obtención del MDE del área de estudio se utilizó el software Surfer, en su versión 9.8.669 de 2009; se digitalizaron también las curvas de nivel, considerando sus coordenadas planas rectangulares y se realizó una interpolación empleando el método Kriging. Como resultado se obtuvo un MDE con una resolución espacial de 25 m, 106 filas y 150 columnas, que incluyen en total 15 900 nodos.

En esta zona se encuentra la estación meteorológica de Casablanca, ubicada en los 23° 08'35" de latitud norte y los 82° 20'30" de longitud oeste, lo cual permite disponer de datos de radiación global medidos en la estación automática de Casablanca. Se obtuvieron mediciones de radiación global promediadas cada 10 min sobre una superficie horizontal, desde el 1ro. de noviembre de 2010 al 16 de mayo de 2011. Como las estimaciones que hace el modelo no tienen en cuenta la nubosidad, fue necesario seleccionar solo los días o intervalos de estos sin presencia de nubes; para seleccionar solo los días con condiciones de cielo despejados se estableció como criterio que la nubosidad existente fuera de menos de dos octavos de cielo cubierto.

Se encontraron ocho días con condiciones de cielo despejado, desde la salida, hasta la puesta del Sol y otros 28 días en que predominaron las condiciones de cielo despejado y, por tanto, también se escogieron los intervalos de estos días con ausencia de nubosidad. Los ocho días fueron: 15 de noviembre; 16 y 22 de diciembre; 24, 25 y 26 de marzo; 9 de abril y 12 de mayo. Mientras que los otros 28 días fueron: 23 y 30 de noviembre; 15 y 31 de diciembre; 6, 8, 11 y 30 de enero; 3, 6, 23 y 26 de febrero; 3, 15, 22, 23 y 30 de marzo; 12, 13,

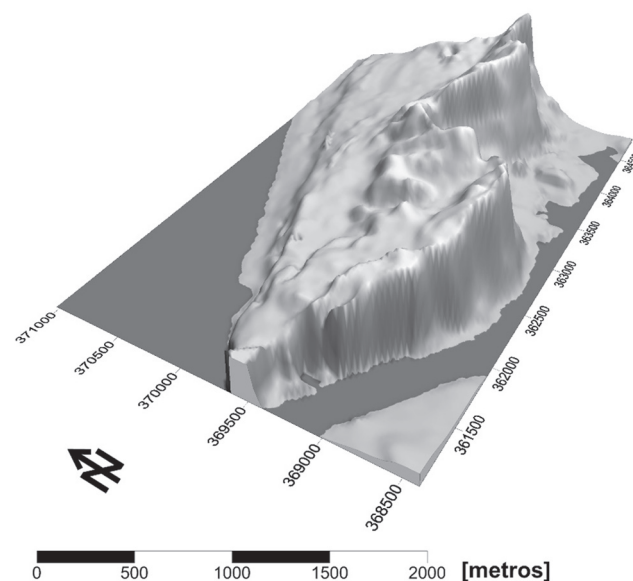


Fig. 1 MDE de Casablanca, elaborado por el autor a partir de la Hoja topográfica 3785-III-b.

17, 18, 21, 23, 29 y 30 de abril y, finalmente, 7, 8 y 16 de mayo. En total, se obtuvieron 2 317 mediciones de radiación global en condiciones de cielo despejado, por lo que se realizaron cálculos con el modelo para cada instante que se contaba con mediciones.

La figura 2 muestra la comparación de la radiación global medida y calculada en la estación de Casablanca. Se asentaron los valores calculados contra los medidos y se obtuvo (por el método de los mínimos cuadrados) la ecuación de la recta que mejor ajusta la nube de puntos.

$$y=1.00305755x-3.09712141 \quad (34)$$

El coeficiente de correlación obtenido para toda la población fue de 0.98. Si se aplica la prueba *t* de Student para conocer la significación estadística del coeficiente de correlación, puede comprobarse que el coeficiente de correlación es estadísticamente significativo, con un nivel de confianza de 95 %. El error absoluto medio es de 22.77.

La figura 3 expone la diferencia entre los valores calculados por el modelo y los medidos en la estación

de Casablanca sigue una distribución normal, donde 51.61 % de los casos presentaron diferencias menores de 20 W/m^2 y 91.62 % de los casos son menores que 50 W/m^2 .

El error promedio de las estimaciones fue de $-11.15 W/m^2$, lo cual denota una subestimación de los valores calculados con respecto a los valores medidos. En cuanto a valores de errores relativos, los resultados son muy buenos: en 86.53 % de los casos, sus valores modulares están por debajo de 15 %.

Resultados y discusión

El resultado más importante de la investigación realizada es lograr un modelo implementado en una herramienta de software que permite obtener las distribuciones espacial y temporal de la radiación global incidente en sectores pequeños de la superficie terrestre para condiciones de cielo despejado.

Distribuciones espacial y temporal de la radiación global teórica

La distribución anual de la radiación global teórica, para el punto donde se encuentra ubicada la estación meteorológica, puede observarse en la figura 4, en la cual se constata que junio es el mes con los valores máximos absolutos y diciembre es el mes con los valores mínimos absolutos. Esto debe su explicación, fundamentalmente, a dos factores: la altura máxima que alcanza el Sol sobre el horizonte y la duración del día. El Sol alcanza su altura máxima sobre el horizonte en el solsticio de verano (en junio), mientras que cuando ocurre el solsticio de invierno (en diciembre), el Sol alcanza su altura mínima sobre el horizonte; por consiguiente, la duración del día el 21 de junio sobrepasa 13,3 h, que resulta el día más largo; en cambio, el 22 de diciembre es ligeramente superior a 10,5 h, que es el día de menor duración. La figura 6 representa la duración del día (en horas) para cada uno de los días del año, en la estación de Casablanca.

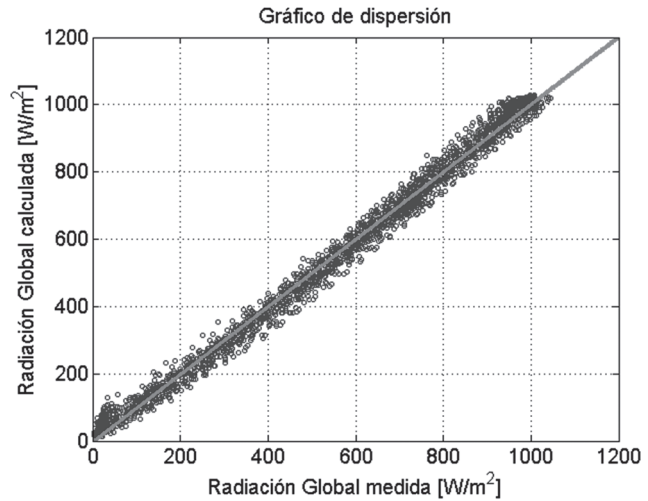


Fig. 2 Dispersión entre estimaciones de la radiación global y mediciones realizadas en la estación automática de Casablanca.

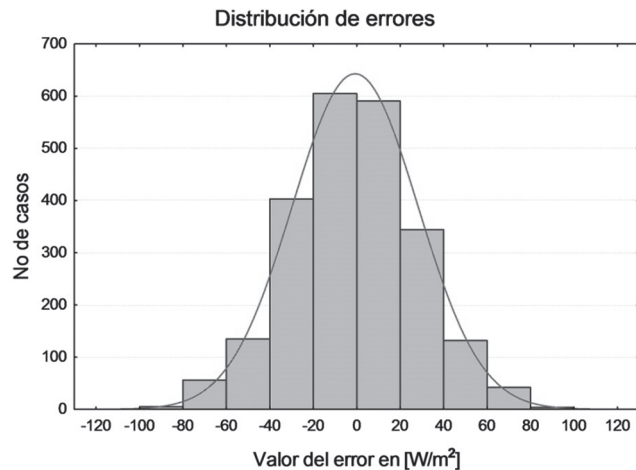


Fig. 3 Distribución de las diferencia entre los valores calculados y medidos.

La figura 5 muestra la distribución cartográfica de los promedios mensuales para los flujos diarios de radiación global teórica incidente sobre la superficie terrestre de la zona de Casablanca. Durante los primeros meses del año, las superficies del acantilado con pendientes alrededor de los 25° y orientadas completamente al sur, reciben los mayores montos de radiación global teórica. Durante el primer semestre, los valores de radiación aumentan, fundamentalmente, porque los días se hacen cada vez más largos y el Sol alcanza cada día una elevación mayor. En junio, la ocurrencia del solsticio de verano, cuando el día supera 13,3 h de duración y el Sol alcanza

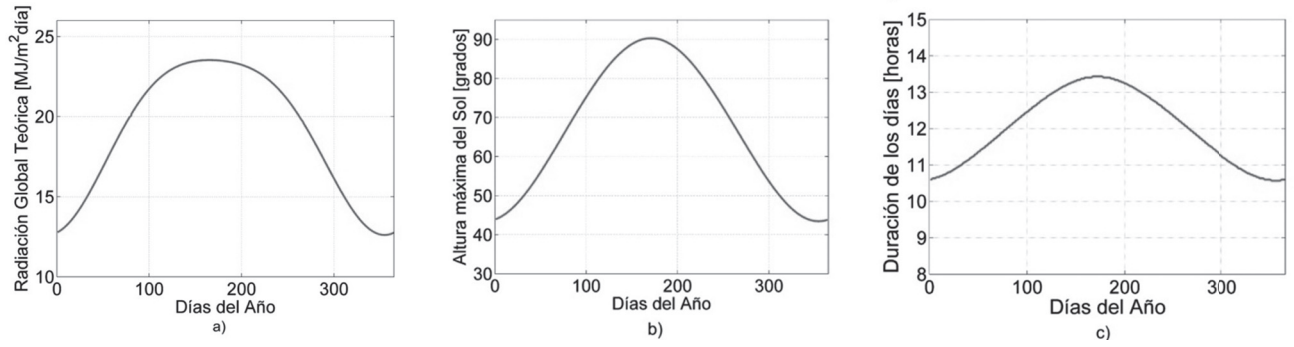


Fig 4 a) Comportamiento anual de la radiación global teórica, b) altura máxima del Sol sobre el horizonte, c) y duración de los días.

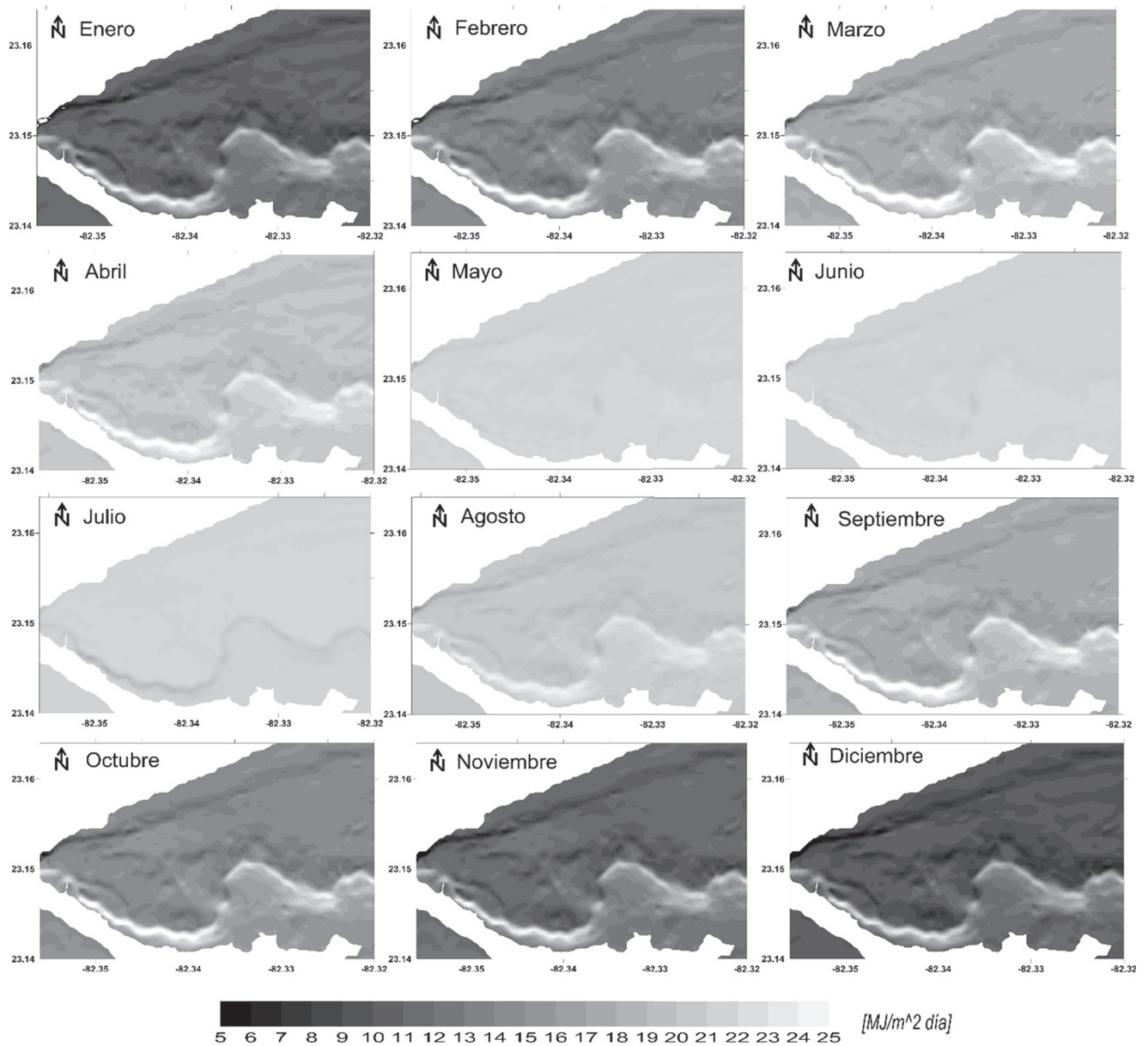


Fig. 5 Distribución espacial de los promedios mensuales para los flujos diarios de radiación global teórica incidente sobre la superficie terrestre en la zona de Casablanca. Meses de enero a diciembre [MJ/m² día].

su altura máxima sobre el horizonte, ocurren los valores máximos de radiación solar incidente. A partir de julio, los valores de energía recibida disminuyen, puesto que los días cada vez duran menos y el Sol alcanza cada día una altura menor sobre el horizonte. Es significativo cómo las superficies del acantilado con pendientes alrededor de los 25° y orientadas completamente al sur, vuelven a recibir los valores de radiación mayores en agosto. Durante el solsticio de invierno (en diciembre), cuando el día apenas sobrepasa 10,5 h y el Sol alcanza su altura menor sobre el horizonte, se observan los valores mínimos de radiación solar incidente.

La figura 6 representa la distribución cartográfica del promedio anual para los flujos diarios de radiación global teórica incidente sobre la superficie terrestre en la zona de Casablanca. Aunque en la mayor parte de este sector de superficie terrestre los valores están entre $17 \text{ MJ/m}^2\text{día}$ y $19 \text{ MJ/m}^2\text{día}$, se encuentran valores máximos en las superficies con pendientes, aproximadamente, entre los 20° y 25° , que están orientadas al sur, mientras los valores de radiación mínimos se reciben en los lugares con pendientes semejantes, pero con orientación al norte.

La distribución espacial de la cantidad de radiación

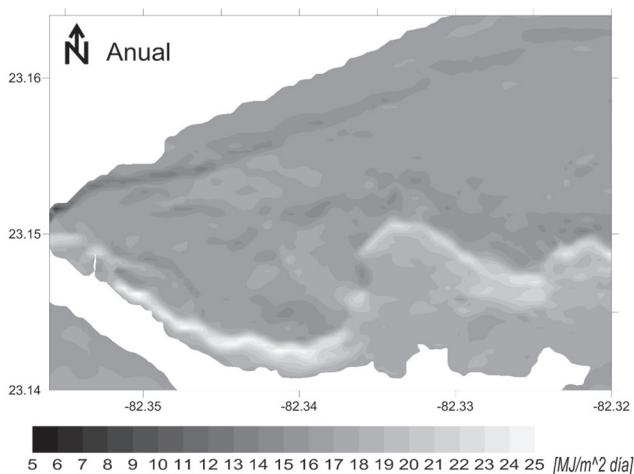


Fig. 6 Distribución espacial del promedio anual para los flujos diarios de radiación global teórica incidente sobre la superficie terrestre en la zona de Casablanca $[\text{MJ/m}^2\text{día}]$.

global teórica recibida durante el día, como promedio al año, puede resultar de importancia en la utilización de la energía solar como fuente de energía renovable, puesto que con este mapa puede determinarse la ubicación más favorable para el aprovechamiento de este recurso natural por medio de paneles solares.

Conclusiones

1. Se obtuvo un modelo para generar las distribuciones espacial y temporal del flujo de radiación global que, teóricamente, incide sobre el relieve de sectores pequeños de la superficie terrestre, en días con condiciones de cielo despejado y considerando, en conjunto, la influencia de los factores meteorológicos, astronómicos y geográficos.
2. Se validó este modelo tomando como referencia las mediciones automáticas realizadas en la estación de Casablanca, y se obtuvo un coeficiente de correlación poblacional de 0,98, mientras el coeficiente de determinación resultó muy bueno (0,97). En 86,53 % de los casos, los valores modulares del error relativo están por debajo de 15 %
3. El modelo está implementado en una aplicación funcional de software, la cual se desarrolla sobre software libre y permite calcular la radiación global teórica incidente para días con condiciones de cielo despejado, en un instante específico, el flujo diario, así como los promedios mensuales y el promedio anual.

Recomendaciones

En los cálculos deben tenerse en cuenta la sombra topográfica, la nubosidad y la radiación solar reflejada por la superficie.

Referencias

- Angström, A 1924, 'Solar and terrestrial radiation', *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society*, vol. 50, pp.: 121-126.
- Borrajero, I 2004, 'Atlas Nacional de Radiación Solar (1986-1988): Metodología', en Informe de Resultado de Proyecto, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, p.89.
- Gallant, J, Wilson J 1996, 'Tapes-G: A Grid-Based Terrain', *Computers & Geosciences*, vol. 22 no. 7, p. 713-722.
- Glover, J, Mc Culler, S 1959, 'The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine', *Quarterly Journal*, vol. 84, pp.: 172-175.
- Gómez-Tagle, A, Chávez, Y 2004), 'Cálculo de la distribución espacial de la insolación potencial en el terreno empleando un MDE en un ambiente SIG', *Investigaciones Geográficas*, vol. 55, pp.: 7-22.
- Hofierka J, Sári M 2002, 'The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications', in *Proceeding of conference "Open source GIS-GRASS users conference 2002"*, Trento, vol. 9, pp.: 11-13.
- Kasten, F, Young, A 1989, 'Revised optical air mass tables and approximation formula', *Applied Optics*, vol. 28, pp.: 4735-4738.
- Kasten, F, Young, A 1996, 'The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness', *Solar Energy*, vol. 56, no. 3, pp.: 239-244.
- Lecha, L 1994, *El Clima de Cuba*, Ed. Academia, La Habana.
- Martínez, E, Campos, A, Borrajero, I, Vázquez, G 1988, 'Algunos índices de la turbidez del aire en la Ciudad de La Habana', *Revista Cubana de Meteorología*, vol.1, no. 1, pp.: 57-60.
- Montero, G, Escobar, J, Rodríguez, E y Montenegro, R 2009, 'Solar radiation and shadow modelling with adaptive triangular meshes', *Solar Energy*, vol. 83, no.7, pp.: 998-1012.
- Muneer, T 1990, 'Solar radiation model for Europe', *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 11, pp.: 153-163.
- Pons, X, Ninzerola, M 2008, 'Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data', *International Journal of Climatology*, vol. 28, pp. 1821-1834.
- Remund, J, Wald, L, Lefevre, M, Ranchin, T y Page, J 2003, 'Worldwide Linke turbidity information', in ISES Solar World Congress, 16-19 June, Goteborg, Sweden.
- Rigollier, C, Bauer O, Wald L 2000, 'On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method', *Solar Energy*, vol. 68, no. 1, pp.: 33-48.
- Scharmer, K, Greif, J 2000, 'The European Solar Radiation Atlas. Database and Exploitation Software', *Les Presses de l'Ecole des Mines*, vol. 2
- Sellers, D 1970, *Physical Climatology*, Instituto Cubano del Libro, La Habana, Cuba.
- Vigón, F 1985, *Análisis Físico- Geográfico de la Radiación Solar Global en el Territorio de la República de Cuba*, tesis, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.