

Estudio preliminar de la radiación solar global en Cuba a partir de modelos teóricos

Orlando H. Álvarez¹, Teresita de J. Gutiérrez², Darwin Molina³

¹Dpto. Meteorología. Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas. orlando21alvarez@gmail.com

²Dpto. de Meteorología Agrícola. Instituto de Meteorología. gutierrezgarciga@gmail.com

³ETSI-Industriales, Universidad Politécnica de Madrid. Máster en Ingeniería eléctrica. darwin_3003@yahoo.es

Autor para correspondencia: Orlando H. Álvarez, orlando21alvarez@gmail.com

(Recibido: 19-02-2021. Publicado: 05-04-2021.)

Resumen

El objetivo del presente trabajo es dar a conocer los avances que se han obtenido para el conocimiento de la variable meteorológica radiación solar en la República de Cuba utilizando para ello modelos teóricos. Se calcularon los valores de la radiación solar teórica en la República de Cuba, a partir del modelo de Hottel, con el uso del software RSE-SOL. Los datos relacionados con la longitud y latitud geográficas y la altura se obtuvieron del Shuttle Radar Topographic Model del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Se utilizaron datos de insolación real de la Red de Estaciones Meteorológicas de Cuba para el período 1975-2003 y se calcularon los datos de insolación teórica. Se presentan los mapas de los promedios diarios para los meses de enero, julio y agosto y el anual de radiación solar global considerando los valores de altura sobre el nivel del mar obtenidos del Modelo Numérico de Terreno de la zona de estudio. Los valores máximos de radiación global anual, se encuentran al Sur del archipiélago, mientras los mínimos aparecen, fundamentalmente en las zonas que se corresponden con los diferentes sistemas montañosos de acuerdo al modelo de día claro de Hottel producto de la nubosidad. De lo anterior, se recomienda continuar con el procesamiento para obtener las radiaciones directa y difusa a fin de culminar todos los elementos que constituyen los diferentes tipos de radiación para su utilización en ingenierías.

Palabras clave: Modelo Hottel, radiación solar, insolación real y teórica.

Abstract

The objective of this work is to publicize the advances that have been made for the knowledge of the solar radiation weather variable in the Republic of Cuba using theoretical models for this purpose. The values of theoretical solar radiation in the Republic of Cuba, from the Hottel model, were calculated with the use of RSE-SOL software. Data related to geographic longitude and latitude and height were obtained from the Shuttle Radar Topographic Model of the United States Geological Survey (USGS). Real sunstroke data from the Cuba Meteorological Station Network were used for the period 1975-2003 and theoretical insolation data were calculated. The maps of daily averages for the months of January, July and August

and the annual global solar radiation are presented considering the sea level height values obtained from the Numerical Terrain Model of the study area. The maximum annual global radiation values are located south of the archipelago, while the minimums appear, mainly in the areas that correspond to the different mountain systems according to Hottel's clear day model product of cloudiness. From the above, it is recommended to continue processing to obtain direct and diffuse radiation in order to complete all the elements that constitute the different types of radiation for use in engineering.

Keywords: *Hottel model, solar radiation, real and theoretical sunstroke.*

1. Introducción

Cuba es un archipiélago con un área de 109 886,19 km², de los cuales 107 466,92 km² pertenecen a la isla de Cuba, 2 419,27 km² a la Isla de la Juventud y el resto a los cayos adyacentes. La isla de Cuba es una franja larga y estrecha, cuya parte más ancha (Playa Tararaco Ganado - Punta Camarón Grande) mide 191 km y la más estrecha (Mariel - Majana) apenas 31 km, con una longitud de costas de 3 209 km al Norte y 2 537 km al Sur. Cuba ejerce jurisdicción marítima hasta 12 millas (19,2 km) y jurisdicción pesquera hasta las 200 millas (320 km). Se extiende entre los 74 grados, 7 minutos, 52 segundos y 84 grados de longitud occidental en relación con el Meridiano de Greenwich, y entre los 19 grados, 46 minutos, 36 segundos y los 23 grados, 17 minutos y 9 segundos de latitud norte. Los límites del archipiélago cubano son: al Norte, el estrecho de la Florida, que lo separa de Estados Unidos de América por 180 km, y los canales de San Nicolás y Viejo de Bahamas, que lo separa de la Comunidad de las Bahamas por 21 km; al Este, el paso de los Vientos entre Cuba y la República de Haití por 77 km; al Sur, el Mar Caribe y el Estrecho de Colón, este último lo separa de Jamaica por 140 km; y al Oeste, el estrecho de Yucatán, hacia los Estados Unidos por 210 km.

El relieve en Cuba se caracteriza por la presencia de terrazas marinas y fluviales, el desarrollo especial del carso y los tipos de costas biogénicas. También predominan las pendientes desnudas o con una cobertura poco potente de sedimentos sueltos que son intensamente lavados en épocas de lluvias. Predomina el relieve de llanura en un 75 % del territorio, seguido por las alturas bajas y montañas. El 4 % del territorio nacional está ocupado por humedales (ECURED de la República de Cuba, 2021). Cuba queda al Oeste del Atlántico Norte, al Norte se encuentra el Estrecho de la Florida y el Canal Viejo de Bahamas; al Este, el Paso de los Vientos; al Sur, el Estrecho de Colón y el Mar Caribe y al Oeste, el Canal de Yucatán. La isla de Cuba supone la mayor parte del territorio del estado cubano. Se extiende 1250 km a lo largo, 191 km en su punto más ancho y 31 km en su punto más estrecho. La isla más grande del estado cubano, fuera de ésta, es la Isla de la Juventud al Suroeste, con una superficie de 2200 km². Los territorios más cercanos son: Las Bahamas (Cay Lobos) a 21 km, Haití a 77 km, Jamaica a 140 km, Estados Unidos (Cayo Hueso) a 150 km, y México a 210 km. El clima de Cuba es tropical, moderado por los vientos alisios; hay dos temporadas bien definidas para la precipitación: una temporada de sequía (noviembre a abril) y una temporada lluviosa (mayo a octubre). Las temperaturas medias oscilan todo el año entre 24,0°C y 26,0°C. En las zonas montañosas ocurren temperaturas que pueden ser inferiores a los 20,0°C. En ese sentido, el objetivo de esta investigación fue presentar una aproximación sobre el comportamiento de la radiación solar en Cuba a partir de modelos teóricos.

2. Materiales y Métodos

A partir de los datos del SRTM (2021) y el EROS Center (2021) se confeccionó un modelo digital

de terreno (MDT) del territorio ocupado por las dos islas principales del archipiélago, el cual se utilizó para calcular los valores de radiación solar global por el método de Hottel (Hottel, 1976) según la metodología propuesta por Passamai (2000), y utilizada por Álvarez et al., (2014) para obtener la radiación solar global en la región Sur de Ecuador. En la figura 1 se presenta el modelo digital de terreno de la República de Cuba.

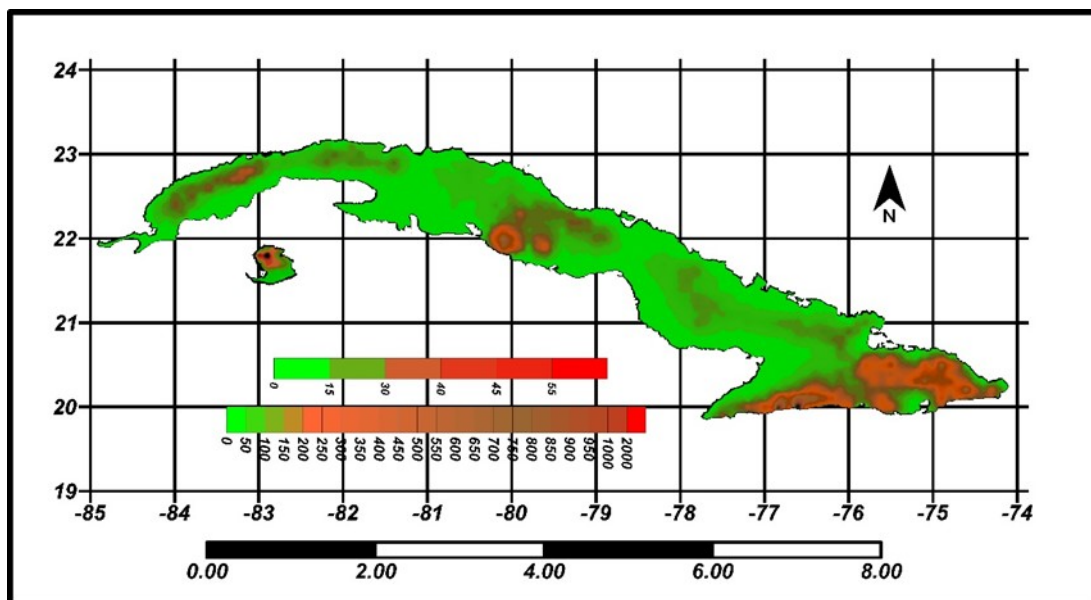


Fig. 1: Modelo Digital de Terreno de la República de Cuba utilizando los datos del SRTM del USGS.

Para la realización del presente trabajo se partió, inicialmente, de la confección de un Libro Excel utilizando para ello la metodología propuesta por Passamai (2000), adicionando un grupo de Hojas de Cálculo, de forma que se pudiera obtener de forma automática el resumen mensual y anual de los valores diarios para los puntos geográficos seleccionados (Álvarez, et al, 2014), para poder interpolar posteriormente estos resúmenes en la confección de los diferentes mapas para la zona de estudio. Posteriormente y debido a la necesidad de conocer el comportamiento de la radiación solar, y para determinar también, qué sectores de la República de Cuba y en qué etapas del año, poseen el mayor potencial solar, y considerando la ausencia de suficientes series de observaciones de esta variable meteorológica, se utilizó el métodos teórico de Hottel para el cálculo de la variable, los cuales se presentan en el trabajo de Molina y otros (inédito) y de Molina, D.P. (2015) en forma de un software, basado en MatLab, para su utilización por cualquier interesado en conocer los valores horarios, diarios, mensuales y anual de la radiación global.

El modelo de Hottel (Passamai, 2000) es de la forma:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{(-k/\cos(\theta_z))} \quad (1)$$

Aquí a_0 , a_1 y k son parámetros ajustados empíricamente (Passamai, 2000) y utilizados por Álvarez y otros (2014).

Para estimar la irradiancia difusa τd para una superficie horizontal se utiliza la expresión de Liu y Jordan (1960) de la forma:

$$\tau d = 0,2710 - 0,2939\tau b \quad (2)$$

Integrando estas ecuaciones, desde la salida hasta la puesta del Sol, se obtiene la irradiación a lo largo de un día. En el modelo de Hottel, la atmósfera estándar representa una condición típica de latitud media y sin contaminación por polución, independientemente del grosor del ozono (Mendoza y Piedra; 2006).

3. Resultados y Discusión

Se utilizaron los datos de elevación obtenidos del mapa topográfico digitalizado de toda la República de Cuba, con las correspondiente curvas de nivel a partir de la información perteneciente al Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (celdas cada 90 metros) y la información de longitud, latitud y altura fueron introducidas en el CAD SURFER®), obteniéndose un modelo numérico de terreno (MNT) mediante interpolación, utilizándose un Modelo de Distancia Inversa al Cuadrado, cada $0,01^\circ$ de longitud y latitud, que permite obtener el valor correspondiente a la altura en cada punto (Figura 1).

Los puntos geográficos se seleccionaron a partir de los valores de longitud y latitud geográfica y la altura sobre el nmm obtenidos a partir del modelo numérico de terreno para la zona de proyecto, calculándose los valores promedio mensuales de radiación global para cada punto y, posteriormente, se confeccionaron los mapas correspondientes de radiación global con cielo despejado, para cada mes y para el anual.

Una vez obtenidos los mapas correspondientes, se procedió a una rectificación de los mismos utilizando para ello datos del cociente de la insolación real y la teórica recalculándose los mapas. A partir de los valores mensuales y anuales de radiación global, sobre una superficie horizontal, considerándose la condición de día claro, para los distintos meses, así como del promedio anual, obtenidos aplicando correcciones utilizando el cociente de la insolación, se obtuvieron los valores de la radiación global para los meses y para el promedio anual. En la figura 3 se muestra el mapa de insolación real promedio anual a partir de las mediciones heliográficas en 62 estaciones meteorológicas. En la figura 2 se presentan los valores mensuales promedios de las 62 estaciones y el valor medio anual.

Al igual que en otros países, tales como España, Ecuador y USA, en Cuba para realizar las medidas de insolación se utiliza el heliógrafo Campbell-Stokes, en el que una lente esférica concentra los rayos de sol sobre una banda oscura de papel, produciendo una quemadura cuando el sol no está oculto, total o parcialmente, por las nubes y han sido muy usadas para evaluar indirectamente tanto la nubosidad N , complemento del cociente entre la insolación medida, I , y la máxima teórica, IT (es decir, $N=1-I/IT$), como la irradiación solar, mediante la aplicación de fórmulas de tipo Angstrom (Gujarro, 2007). En nuestro caso, utilizamos directamente el cociente entre I e It para determinar la disminución del valor teórico de la radiación global teórica, no obstante se muestran los valores de la nubosidad promedio por meses a fin de poder analizar el comportamiento en diferentes meses.

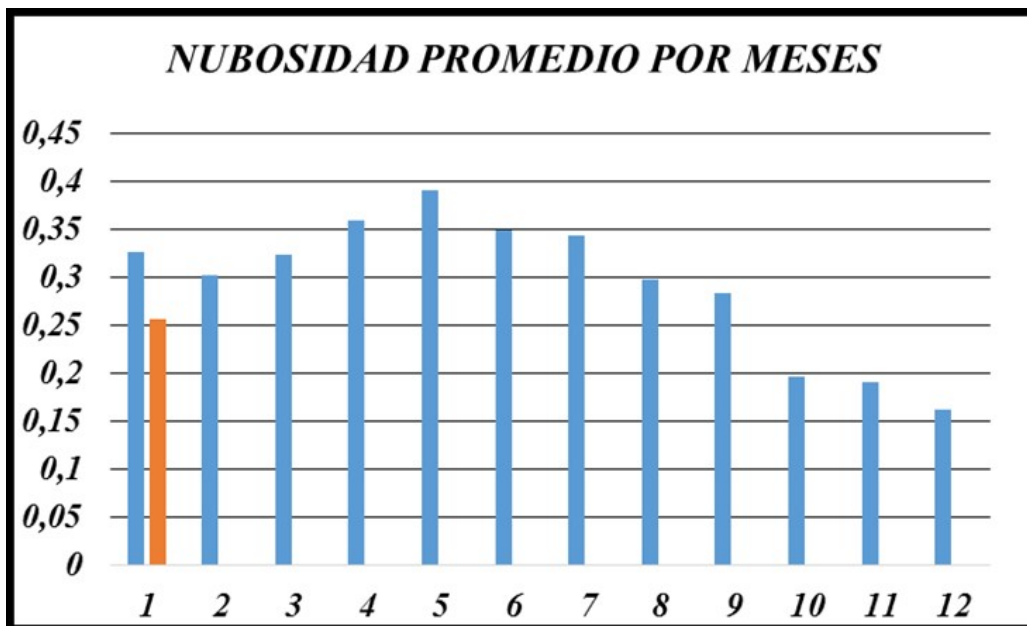


Fig. 2: Nubosidad promedio para toda Cuba por meses (azul) y anual (naranja).

A partir de los datos de las tablas obtenidas para cada uno de los puntos de una rejilla con los extremos: -85.0° W, -74.0° W; y 19.0° N, 24.0° N, en longitud y latitud respectivamente, con un tamaño de celda de 0.01° , se calcularon los valores promedio mensuales y anuales para el período de 28 años incluidos en los datos reales de insolación en 62 estaciones meteorológicas de la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas de Cuba (figura 3), mediante una interpolación utilizando un modelo de Distancia Inversa al Cuadrado.

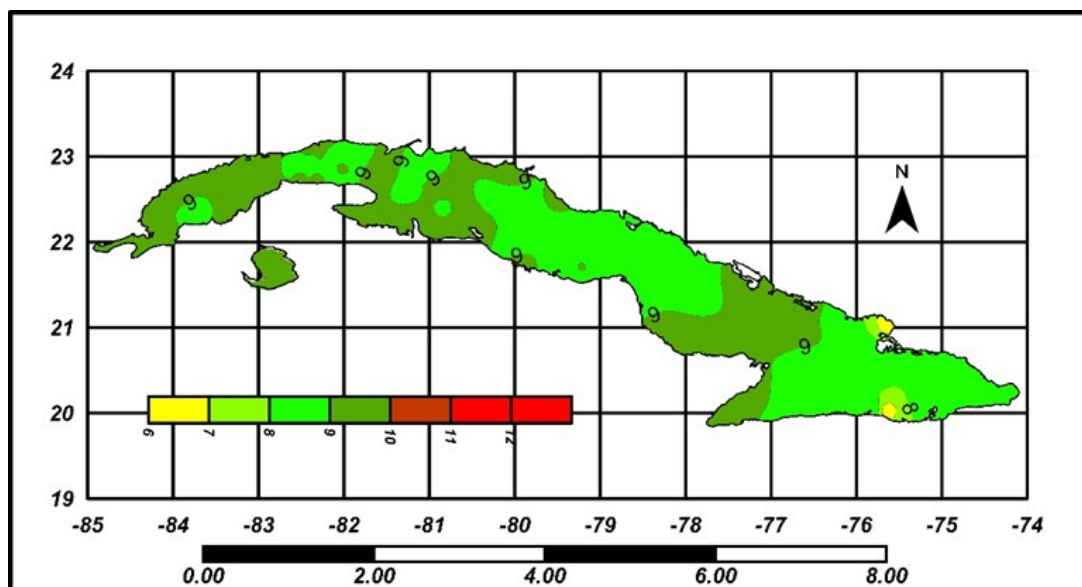


Fig. 3: Insolación real anual para el período 1975 – 2003.

Se realizó una superposición para los datos de la suma mensual de la radiación teórica obtenida por el método de Hottel para cada mes particular y para el promedio anual, mediante multiplicación con el porcentaje de horas sol obtenido para cada mes y promedio anual para determinar la cantidad de radiación que corresponde a cada uno de los períodos. En la figura 4 se

muestra el mapa de los valores relativos de insolación real/insolación teórica para el mes de enero.

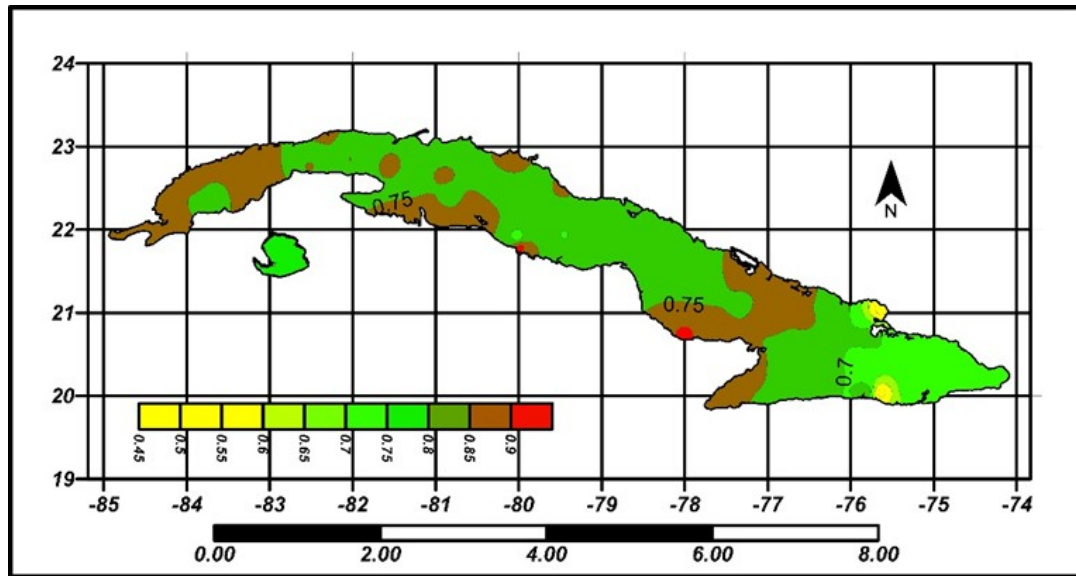


Fig. 4: Relación insolación real/insolación teórica anual.

En la figura 5 se muestra el mapa del promedio diario de la radiación global correspondiente al período anual en la zona de estudio. De acuerdo con el modelo de día claro de Hottel, se observa una disminución de los valores de radiación solar debido a la presencia de la nubosidad, además se invierten las zonas con mayores y menores valores de este factor meteorológico y climático, debido a la nubosidad que se genera en las zonas más altas del archipiélago.

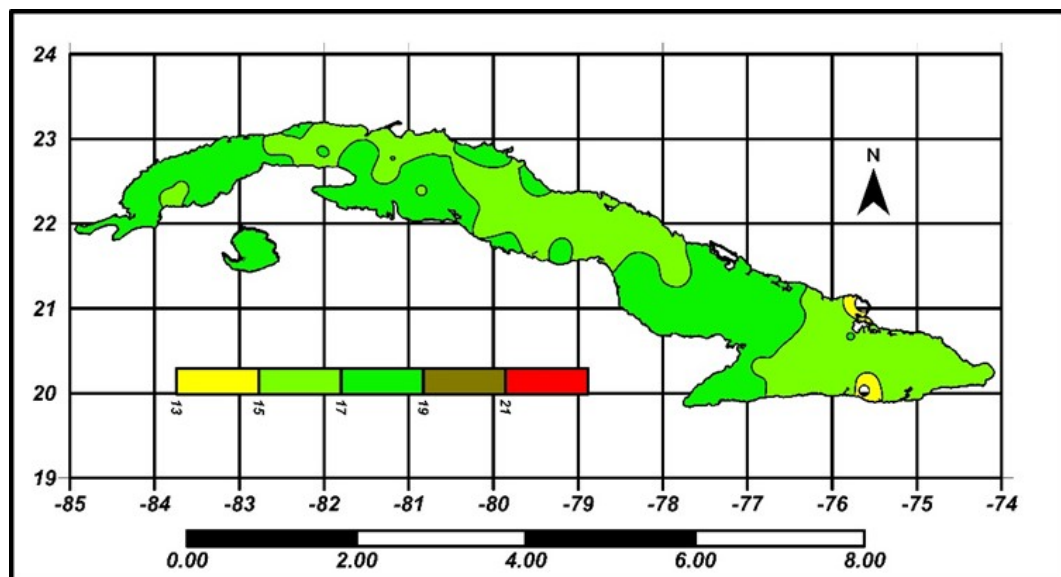


Fig. 5: Radiación global media diaria anual en MJ/m²día.

Se calcularon igualmente los promedios diarios en MJ/m².día para los diferentes meses. En la figura 6 se muestra el mapa de los valores relativos de insolación real/insolación teórica para el mes de enero. En esta figura se pueden observar los menores valores en las zonas más elevadas, lo cual se corresponde con condiciones de nubosidad alta. En la siguiente figura 7 se muestra

el mapa promedio de radiación global correspondiente al mes de enero donde se aprecia que los valores más bajos de radiación se relacionan con los valores de la relación de la insolación real y teórica, además de encontrarse en el período invernal y en la figura 8, la correspondiente al mes de julio, donde el aumento de los valores de radiación responde al período de verano en Cuba.

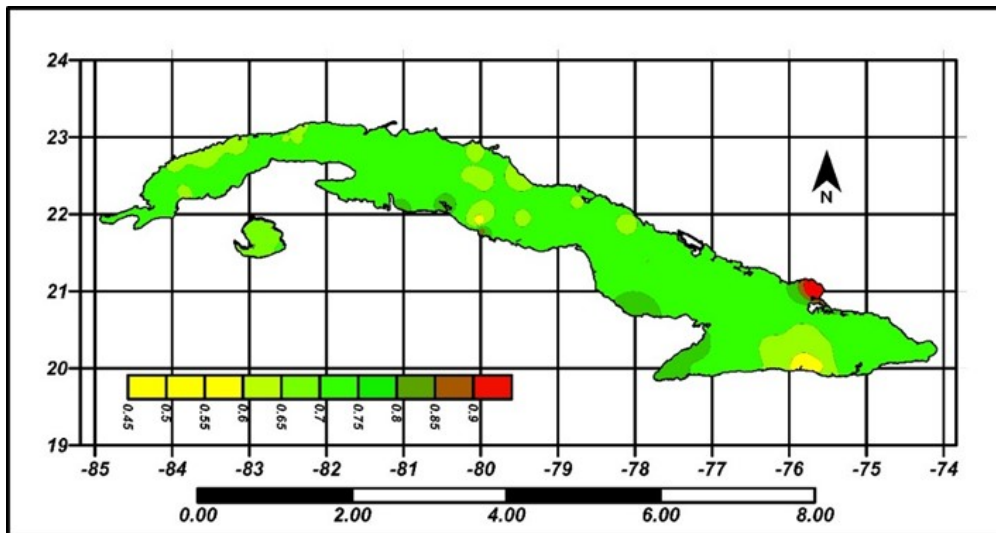


Fig. 6: Relación insolación real/insolación teórica enero.

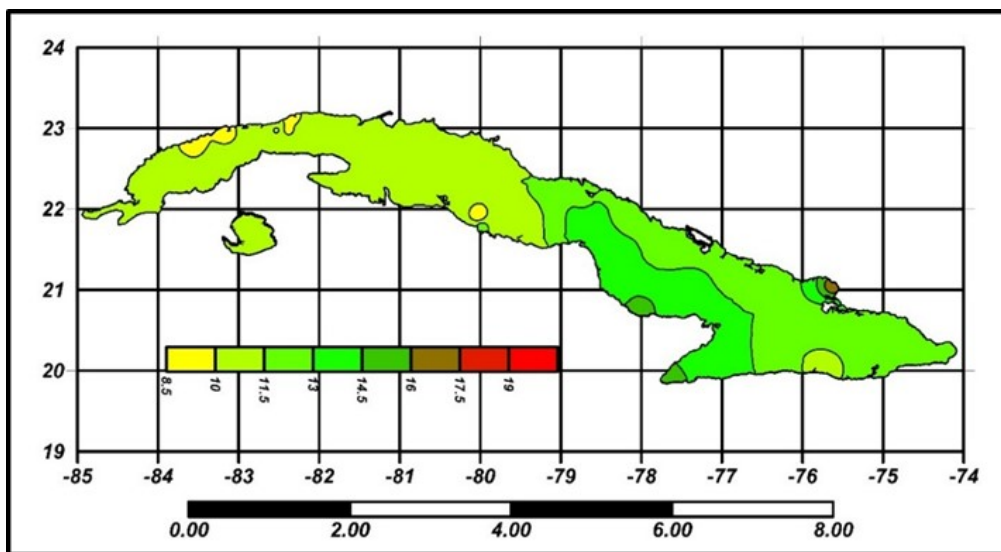


Fig. 7: Radiación global media diaria de enero en MJ/(m²día).

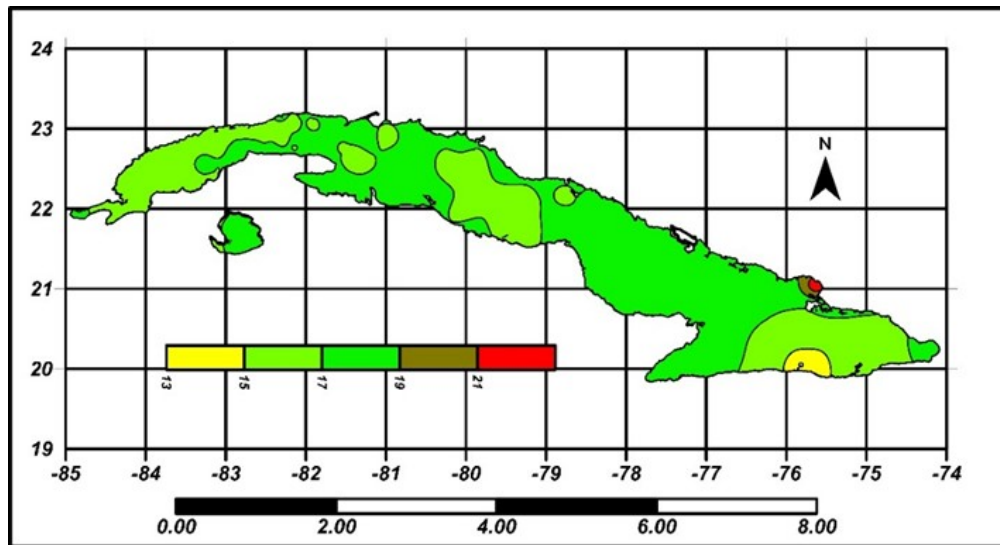


Fig. 8: Radiación global media diaria de julio en MJ/(m².día).

En las figuras 9, 10 y 11 se muestran, respectivamente los mapas de la relación insolación real/insolación teórica para el mes julio y de radiación global en MJ/(m²día) y mapa de la relación insolación real/insolación teórica para el mes de agosto. En este caso se puede observar que los valores de radiación global superan aquellos correspondientes al período anual, al tiempo que los valores de la relación de insolación real respecto a la teórica superan también, tanto al período anual como al mes de julio. Esto puede explicar los valores inferiores de radiación global correspondientes al mes de julio respecto al mes de agosto.

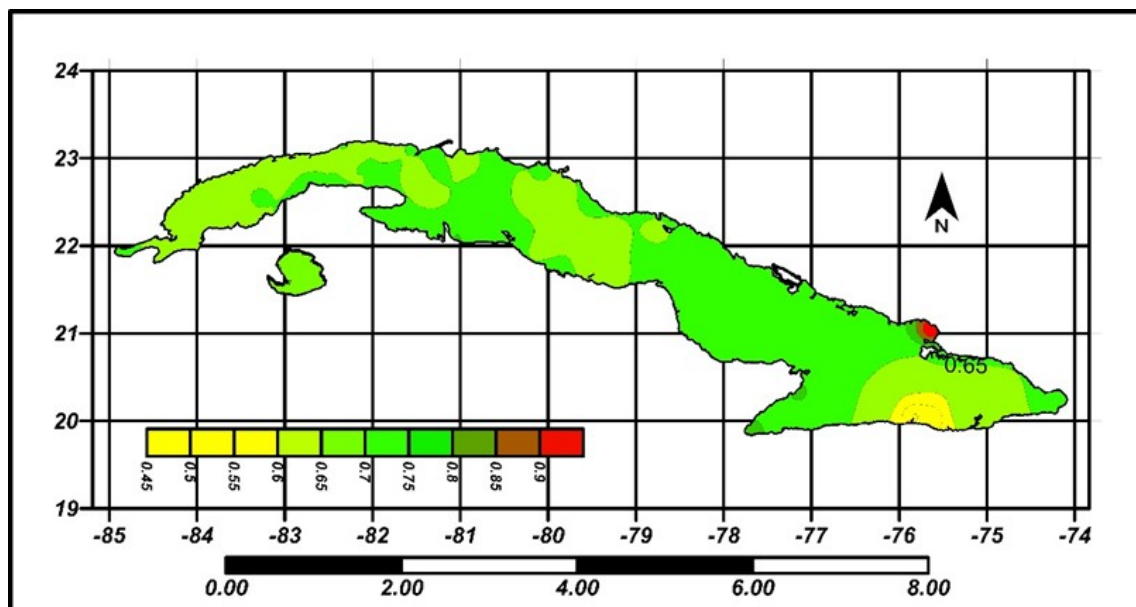


Fig. 9: Relación insolación real/insolación teórica julio.

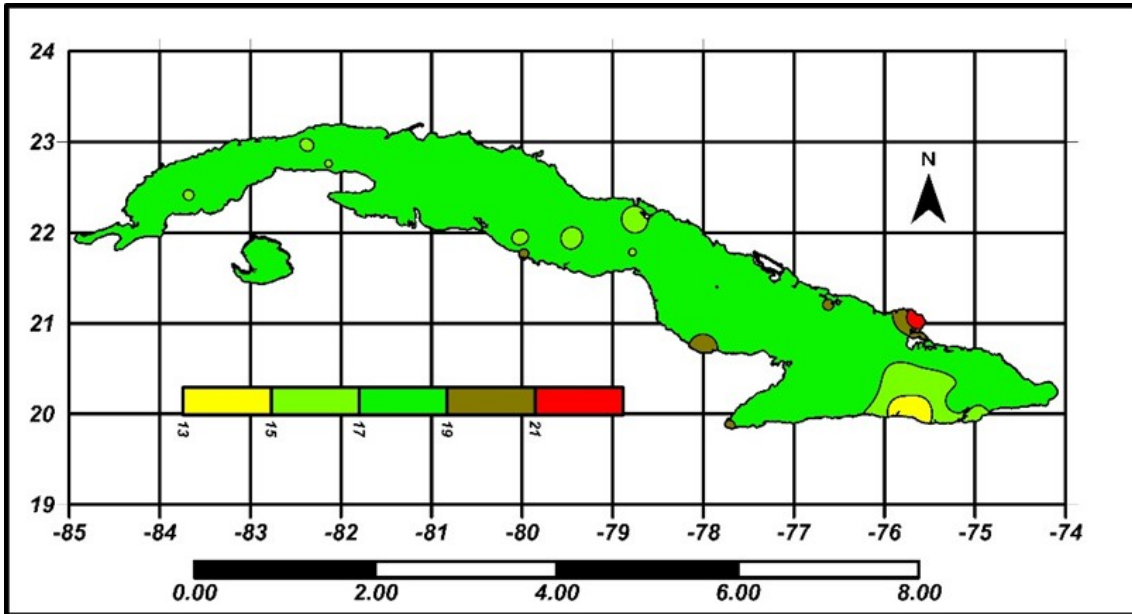


Fig. 10: Radiación global media diaria de agosto en MJ/(m²día).

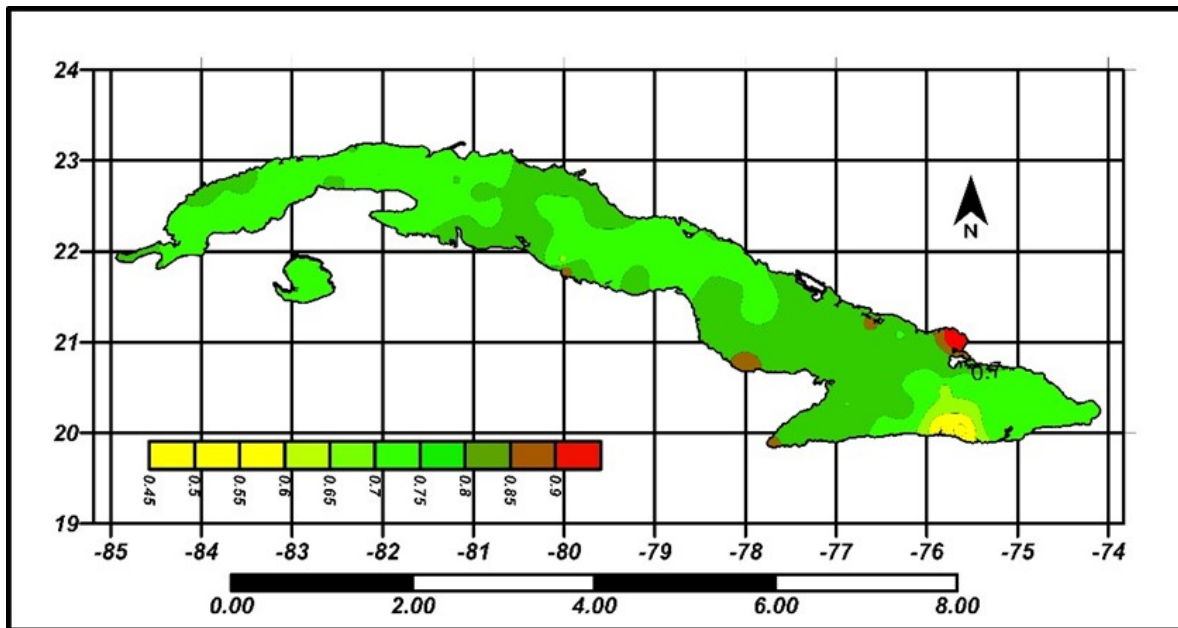


Fig. 11: Relación insolación real/insolación teórica Agosto.

Conclusiones

Los valores máximos de radiación global anual, se encuentran al Sur del archipiélago, mientras los mínimos aparecen, fundamentalmente en las zonas que se corresponden con los diferentes sistemas montañosos. Los valores más bajos de radiación global se producen en el mes de enero con un valor promedio para todos los datos considerados (11019) de 20,69 MJ/(m².día), mientras los mayores se observan en los meses de julio 26,2 MJ/(m².día) y agosto con 25,24 MJ/(m².día). Para el período anual, el promedio de todos los datos resultó ser 23,59 MJ/(m².día). Debido a la presencia de la nubosidad, disminuyen considerablemente los valores de radiación solar posibles a obtener de acuerdo al modelo de día claro de Hottel, además se invierten las zonas con mayores y menores valores de este factor meteorológico y climático, debido a la nubosidad que se genera en las zonas más altas del archipiélago, lo cual determina los valores de la insolación real en esas zonas. De lo anterior, se recomienda continuar con el procesamiento mediante el programa RSE-SOL de las radiaciones directa y difusa a fin de culminar todos los elementos que constituyen los diferentes tipos de radiación para su utilización en ingenierías.

Referencias bibliográficas

Álvarez OH, Montaña TE, Quentin E, Maldonado J, Solano JC (2014): La radiación solar global en las provincias El Oro, Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. Utilización de datos de reanálisis de la nubosidad diurna. *Revista de Climatología*, 14:25-33.

ECURED de la República de Cuba. (2021): Historia de Cuba. https://www.ecured.cu/Rep%C3%BAblica_de_Cuba#Geograf.C3.ADa

Guijarro JA (2007): Cambios en la medida de las horas de insolación: Análisis de su impacto en dos observatorios de las Islas Baleares (España). *Revista de Climatología*, 7:27-32.

Hottel HC (1976): A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, 18:129.

Liu BYH, Jordan R (1960): Interrelationships and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4:1-19.

Mendoza I, Piedra D (2006): Validación y ajuste de modelos de radiación solar directa para la ciudad de Bogotá a partir de datos experimentales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Proyecto Curricular de Licenciatura en Física - Grupo Energías Alternativas. *Rev. Colombiana de Física*, 38:1435-1438

Molina DP, Álvarez OH, Montaña TE (Inédito): Softwares para el cálculo de la radiación solar teórica con cielo despejado.

Molina DP (2015): Elaboración de una Metodología para obtener la Radiación Solar Global Teórica para un Sector Específico. [Tesis de Grado]. Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

Passamai VJ (2000): Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. <http://www.unsa.edu.ar/passamai/passam2.pdf>.

Shuttle Radar Topographic Model (SRTM) (2021): U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data. [Conjunto de datos]. <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (2021): Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. [Conjunto de datos]. https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects