

DETERMINACION DE LA IRRADIACION SOLAR SOBRE EL TERRITORIO DE CUBA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATELITES.

Autores: Israel Borrajero Montejo*
Lourdes Lavastida**
Juan Carlos Pelaez Chavez*

Instituto de Meteorología de Cuba

La investigación se realizó dentro del acápite relacionado con la radiación solar del Proyecto SWERA para Cuba

* Grupo de Radiación Solar del Centro de Física de la Atmósfera
del Instituto de Meteorología de Cuba
Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente

** Dpto de Información de Satélites del Centro Nacional de Pronóstico
Instituto de Meteorología de Cuba
Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente

Introducción.

El Sol, fuente de vida, es la energía más importante disponible en el planeta y desempeña un papel principal en la formación y cambios del clima en la tierra. Cuba está ubicada en una zona tropical, con abundante radiación, por lo que esta constituye un valioso recurso.

La radiación solar atraviesa la atmósfera y llega a la superficie de la tierra en forma de ondas electromagnéticas de longitudes entre 0.3 y 3 μm . Los componentes atmosféricos, fundamentalmente el agua en forma de nubes, reflejan, absorben y dispersan una parte de esta radiación, por lo que la radiación solar que llega a la superficie (radiación global) es la suma de la radiación que llega directamente del sol (radiación directa) y la que llega después de la dispersión y reflexión por los componentes atmosféricos (radiación difusa).

La radiación solar puede satisfacer muchas de las necesidades del hombre, si aprendemos cómo utilizarla de forma racional. Esta energía se aprovecha directamente o bien convertida en otras formas útiles como calor o electricidad.

Por medio de paneles solares se obtiene electricidad con bajo costo y sin peligro de contaminación para la atmósfera. Esta electricidad se usa con mucho éxito en Cuba en las zonas rurales. El calor recogido en los colectores puede destinarse a la obtención de agua caliente para consumo doméstico o industrial y en países fríos es usado para climatizar los locales y las piscinas.

Para la agricultura tiene una gran importancia, pues la radiación solar es una de las variables meteorológicas que más afecta a los cultivos, influye en la humedad del suelo, la evapotranspiración y la fotosíntesis, el conocimiento de ella en la zona, en las distintas épocas del año ayuda a la obtención de mejor rendimiento en los cultivos y además tiene múltiples aplicaciones, como los invernaderos, secaderos, etc.

En la arquitectura juega un papel principal para obtener una mejor distribución, las edificaciones se construyen teniendo en cuenta las paredes que mayor calor reciben.

En el mejor aprovechamiento de esta energía es fundamental su estudio y para ello se utilizan las mediciones de la radiación global, directa y difusa. En Cuba se cuenta solamente con 4 estaciones para medir la radiación solar, lo cual es muy deficiente, pues esta varía mucho por zonas, en dependencia de la nubosidad. Una red de estaciones para caracterizar el régimen de radiación solar en todo el país resultaría muy costosa, por lo que se han utilizado métodos indirectos para estimarla por medio de otras mediciones, como insolación o nubosidad, pero aun la red de estaciones heliográficas y meteorológicas tiene grandes zonas con una cobertura deficiente, particularmente en regiones donde la radiación solar tiene un régimen muy diferenciado, como las regiones montañosas de Oriente.

Desde la aparición de los satélites meteorológicos se abrió una nueva perspectiva para estimar este parámetro y se han realizado estudios encaminados a ello. En los últimos 30 años la literatura especializada reporta diversos métodos de cálculo de la radiación solar, con distintos grados de complejidad. En Cuba, en el año 2000, se confeccionó un método con imágenes de satélites GOES de baja resolución espacial y temporal (8 Km y cada una hora), que a pesar de sus limitaciones se aplicó operativamente durante dos años.

Con la adquisición en Cuba de una estación de alta resolución espacial (1Km por píxel) y temporal (cada 15 minutos) surgió una nueva vía para estimar la radiación solar con mayor precisión por medio de las imágenes de satélite. El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un nuevo método que permita aprovechar todo este potencial de información.

Una característica distintiva del método propuesto en este trabajo es que no utiliza la información de las imágenes de forma cuantitativa en el cálculo de la radiación, sino que a partir de ellas se aplica un método de clasificación automática de tipos de nubes para determinar las condiciones de nubosidad en cada píxel, y con la ayuda de relaciones empíricas se modifican los resultados de un modelo físico de cálculo de la radiación ante cielo despejado para obtener estimaciones que reflejen las condiciones reales.

Revisión bibliográfica

Estimación de la radiación solar mediante imágenes de satélite

Casi desde que se hicieron disponibles las imágenes de satélite de alta resolución en formato digital, comenzaron a aparecer estudios sobre la estimación de la radiación solar a partir de estas. Un trabajo de Gautier, Diak, y Masse (1980) da una pauta de la metodología general seguida hasta nuestros días. En este trabajo se incorpora un modelo de cálculo de cierta complejidad, que requiere información del contenido de agua precipitable, al mismo tiempo incorpora el efecto de la nubosidad aplicando una relación lineal simple entre la brillantez de la nube en la imagen de satélite y su factor de absorción. El método se aplica a imágenes de alta resolución (1 – 2 km/píxel) y puede calcular la distribución de la radiación sobre grandes áreas. En este trabajo también se presenta una discusión acerca de la comparación entre las mediciones hechas puntualmente con piranómetros y los valores estimados a partir de las imágenes, que consisten en resultados promediados sobre el área correspondiente a uno o varios píxeles.

Mosser y Raschke, (1983,1984) utilizan las imágenes del METEOSAT, cuyas características son algo diferentes de las del GOES y aplican una normalización de los valores de píxel llevándolos de su valor original al intervalo definido por los valores máximo y mínimo observados para cada píxel de la imagen en dependencia de la hora y la época del año. A partir de mediciones terrestres se calcula una relación entre los valores de píxel normalizados y el cociente entre la radiación incidente y la radiación máxima (ante cielo despejado), esta relación depende además del ángulo cenital del sol. Este trabajo también presenta un estudio acerca del efecto que tiene el número de imágenes empleadas a lo largo del día sobre la exactitud de las sumas diarias calculadas.

Schulze-Kegel y Heidt (1996) definen un índice de brillantez aparente que tiene en cuenta los ángulos de elevación del sol y del satélite sobre cada píxel de la imagen y de aquí se define un índice de cobertura nubosa, también a partir de los valores mínimos y máximos de brillantez aparente para un período de tiempo y al igual que en los otros trabajos, este índice de cobertura nubosa se relaciona linealmente con el factor de transparencia atmosférica. Este trabajo obtiene desviaciones del orden de un 15% con respecto a mediciones en tierra, para valores medios mensuales.

Según Rigoliet et al. (2002) en la serie de métodos publicados en los años 90 como Heliosat, se aplica un modelo normalizado tanto para los valores de píxel ante cielo despejado como para los de zonas nubladas. Se aplica una relación lineal al índice normalizado de los valores para las zonas nubladas, para obtener el índice de transparencia de la nubosidad. De esta manera se calcula la radiación tanto para las áreas de cielo despejado como para cielo nublado.

Este método fue inicialmente publicado como Heliosat 1. En la segunda versión, Heliosat 2 se toma en cuenta el estado óptico de la atmósfera y se introduce un método de calibración de imágenes que permitiría trabajar con distintos sensores.

Colle et al (1999) aplica también una transformación para llevar el valor de píxel a un rango normalizado entre los valores mínimo y máximo observados, después calculan mediante un modelo de transferencia radiativa los valores de radiación correspondientes a los casos extremos de cielo despejado y completamente cubierto y se supone una relación lineal entre el intervalo de valores de radiación calculados y el valor normalizado obtenido de la imagen que se utiliza para el cálculo.

Pérez et al (2002) presentan un método de cálculo que estima los valores de radiación ante cielo despejado mediante el uso de un modelo simplificado y a continuación determinan un índice de nubosidad tomado a partir de las imágenes visibles, mediante el cual se modifican los valores calculados para obtener los valores definitivos de radiación.

El modelo GL 1.0 del Centro de Prevención del Tiempo y Estudios Climáticos y del INPE en Brasil parte de una ecuación simplificada de transferencia radiativa en las zonas de entre 400-700 nm y 700-4000 nm. Se toma como hipótesis que en este rango espectral casi no hay absorción en la atmósfera, por lo tanto el término de absorción por aerosoles se puede despreciar, de manera que la radiación se puede obtener conociendo el valor de la radiación extraterrestre.

Hoyos et al (2000) utilizan un método que emplea el mismo modelo de transferencia (GL 1.0) del INPE, las diferencias fundamentales consisten en una implementación acabada que facilita su utilización para puntos seleccionados de la imagen.

Estos dos métodos no contemplan el efecto de la nubosidad ni permiten el cálculo para áreas grandes. El modelo GL 1.0 pudiera utilizarse con alguna parametrización del efecto de la nubosidad para incluir el efecto de ésta, pero de todas maneras es necesario conocer el albedo de la superficie.

Una publicación muy interesante de Pérez y Seals (1997) hace un estudio comparativo de los métodos de cálculo de la radiación solar basados en información de satélite y a partir de redes de estaciones en tierra. Los métodos basados en satélite presentan un error relativamente alto (de hasta un 20%) con respecto a las estaciones terrestres, pero cuando se tiene que determinar la distribución de la radiación sobre un área extensa, las redes de estaciones resultan insuficientes y los métodos de interpolación que es necesario emplear introducen un error que es mayor a medida que los puntos están más lejos de las estaciones, se determinó que para distancias mayores de 23 km, este error es mayor que el que se obtiene con los métodos basados en imágenes de satélite

Se concluye que el cálculo basado en satélite ofrece grandes ventajas sobre las redes de estaciones terrestres en términos de resolución y bajo costo. Se propone que las estaciones terrestres deben dedicarse a aportar valores de referencia para control de los cálculos hechos a partir de la información de satélite.

Pereira et al (2003) han realizado un estudio comparativo de los modelos Brasil SR y Sony de la universidad de Albany mostrando que ambos modelos ofrecen resultados que son estadísticamente semejantes, con valores de correlación entre 0.92 y 0.96 para valores horarios y valores de 0.96 para valores de suma diaria.

En Cuba se han realizado varios estudios de la distribución de la radiación solar, basados fundamentalmente en la dependencia de ésta con otras variables que se miden en un número grande de estaciones, como la cantidad de horas con brillo solar, aplicando fórmulas empíricas de tipo Ångström, Campos et al (1988 y 1989). También se han desarrollado métodos basados en la digitalización de las cartas heliográficas Borrajo . et al (1989 y 1990), Vigón et al (2001) y Rodríguez (2002).

El primer trabajo en Cuba de cálculo de la radiación utilizando imágenes de satélite fue presentado por Rivero (2000). Fue hecho con imágenes analógicas visibles de una estación de baja resolución (8 Km. de resolución con intervalos de una hora). Se establecieron umbrales para determinar la presencia o ausencia de nubes mediante un ajuste empírico de los valores de suma diaria obtenidos con valores medidos en 3 estaciones durante un año, mediante la aplicación de un método de tipo Monte Carlo.

Clasificación Automática de Nubes

Aunque no hay ejemplos abundantes de aplicación de métodos de clasificación de nubes aplicados al cálculo de la radiación, sí se han encontrado trabajos de clasificación automática de nubes para otros propósitos, por ejemplo, en el proyecto ATSR (Along Track Scanning Radiometer) se muestra un conjunto de métodos para la distinción de píxeles que representan zonas nubladas y con cielo despejado, el más sencillo es utilizar el canal de 12 μm y considerar nublado todos aquellos píxeles cuya temperatura de brillantez sean menores de cierto umbral.

El llamado test de Ci delgados se basa en la diferencia de las temperaturas de brillantez de los canales de 11 y 12 μm . Se usan 5 umbrales para esta diferencia en dependencia de los distintos valores de masa de aire, según el ángulo de barrido.

El llamado test de niebla y estratos bajos se basa en el hecho de que los estratos y la niebla tienen una emisividad más alta en 11 μm que en 3.7 μm , de ahí que la diferencia entre estos dos canales pueda ser usada para la detección de este tipo de nubes.

El test de nubes medias y altas se basa en la diferencia entre los canales de 3.7 y 12 μm para detectar casi todos los tipos de nubes medias y altas que resultan semitransparentes.

El test de coherencia espacial en 11 μm se basa en el hecho de que fuera de zonas costera o de frentes activos, la temperatura superficial del mar es relativamente uniforme en áreas de unos pocos Km^2 y el gradiente de temperatura raramente excede los 0.3 $^{\circ}\text{Km}$. Esto no ocurre en las nubes, donde las temperaturas de los toques pueden variar varias decenas de grados en unos pocos Km .

El test de reflectividad en 1.6 μm se basa en que fuera de las áreas de destello luminoso la reflectividad del agua en el VS y el IR cercano es muy baja, mientras que las nubes dispersan fuertemente, de manera que las nubes pueden detectarse por la fuerte señal que devuelven.

El test del histograma en el IR se basa en que suponiendo constante la temperatura superficial del mar, los píxeles con menos temperatura de brillantez corresponden con las zonas de mayor contenido de vapor de agua y con las mayores diferencias entre los canales de 11 y 12 μm , o sea, la temperatura de brillantez en los canales de 11 y 12 μm y sus respectivas diferencias están negativamente correlacionadas para los píxeles despejados y positivamente para los nublados. Este test solamente se aplica a píxeles que hayan sido considerados despejados por los tests anteriores.

Estos tests están basados en los algoritmos APOLLO desarrollados por Saunders (1986) y Saunders and Kriebel (1989) para el ATSR y hacen uso de varios canales visibles e infrarrojos. Aunque constituyen la base de numerosos sistemas de detección, solo pueden ser usados como guías en el caso en que solamente se dispone de 2 canales.

Cervino et al (1998), introducen una mejora al Algoritmo de Remoción de Nubes utilizando imágenes ATSR-2. El "Global Ozone Monitoring Experiment" (GOME) a bordo del satélite ERS2 tiene el objetivo de determinar el contenido total de ozono a una resolución de 320 X 40 km^2 . La detección y clasificación de nubes en la escena es importante en el análisis espectral de los datos anterior al cálculo del ozono en la columna. El detector del GOME funciona en tres bandas espectrales anchas a 295-397 nm, 397-580 nm y 580-745 nm. El algoritmo de remoción de nubes se basa en umbrales seleccionados para el valor de la comparación entre los dos últimos canales que determinan si un píxel es nublado (C), despejado (F) o indeterminado (P). Estos umbrales se han calculado empíricamente comparando los resultados con los del método del ATSR-2

Un ejemplo de comparación entre métodos de detección es expuesto por Martínez et al. (2000). Se hace una comparación de tres métodos de detección de cobertura nubosa en imágenes visibles e infrarrojas térmicas. Los métodos son la Coherencia Espectral, los umbrales y el análisis de histogramas.

El primero se basa en la mayor coherencia espectral (menor variación) de los píxeles en las zonas de imagen correspondientes a la superficie que en los correspondientes al tope de nubes, utiliza umbrales para distinguir entre valores nublados y despejados. Puede utilizar entre otras variantes el cálculo de la desviación estándar en celdas de 3x3 o la diferencia entre los valores máximo y mínimo en la celda, se aplica tanto en las imágenes visibles como en las infrarrojas.

El método del umbral consiste en determinar umbrales que determinen si un píxel está despejado o cubierto, se usa con mucha frecuencia, pero la selección de los valores de umbral es problemática.

El método de los histogramas es una forma de seleccionar umbrales a partir del histograma de tonos de gris de la imagen, este típicamente debe tener dos máximos, uno en la zona correspondiente a los valores de las zonas nubladas y otro en la de las zonas despejadas. El mínimo entre estos dos máximos indica el mejor valor del umbral.

En el caso de los histogramas bidimensionales, estos se hacen conjuntamente entre dos imágenes, típicamente una visible y una infrarroja. Distintos tipos de nubosidad tienden a formar agrupamientos localizados en distintas zonas de la superficie, esto permite definir regiones donde puede estar localizado un píxel que define su estado. Este método resulta muy conveniente para nuestras condiciones de trabajo, porque el archivo de imágenes de que se dispone solo incluye estos dos canales.

Según Sánchez (2003), en la identificación de patrones en las imágenes de alta resolución es muy útil emplear técnicas que determinen la textura, que no es más que la variación del contraste entre píxeles vecinos, o sea, la variabilidad local de la reflectividad de un área que a mayor escala se puede considerar como homogénea. Para la aplicación de este método tenemos dos etapas: el reconocimiento de las regiones homogéneas que se quiere que sirvan de patrón y la clasificación de toda la imagen según esas clases. Para aplicar el algoritmo de reconocimiento, el cálculo de parámetros textuales se hace a través de la aplicación de parámetros estadísticos. Los mejores resultados en la clasificación de imágenes parecen alcanzarse con el uso híbrido entre la clasificación espectral basada en el píxel y la información de textura.

En el capítulo 3 de su tesis de doctorado Rivera (2002), hace una descripción de varios satélites meteorológicos, en particular del Meteosat europeo, también describe las características de las bandas espectrales y de algunos procesos que sufre la radiación proveniente de la superficie de la tierra al interactuar con distintos tipos de nubes.

Lo más importante para este trabajo es la descripción del método de los histogramas bidimensionales aplicados a imágenes VS-IR y a las IR-WV, en ambos casos se observan los agrupamientos correspondientes a los distintos tipos de nubes, así como a las superficies de tierra y mar.

Materiales y métodos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un método de clasificación automática de nubes aplicado a las imágenes de satélite geoestacionario GOES, basado en el concepto de los histogramas multidimensionales. Con la información obtenida de los tipos de nubes y con relaciones entre valores de radiación para distintas condiciones de nubosidad y ante cielo despejado, derivadas de tablas publicadas por Kondratiev (1969), se modificó la salida de un modelo físico de cálculo de flujos de radiación y de esa forma se obtuvo la distribución de la irradiancia global para todos los píxeles de la imagen.

Clasificación visual de las nubes en las imágenes de satélite.

Canal visible:

Una gran parte de la energía radiada por el sol, pertenece a la longitud de onda del rango visible. Dado que la atmósfera es muy transparente a estas longitudes de ondas y que la reflectividad media de las nubes, el mar y la tierra es alta, en el satélite el sensor mide la radiación reflejada por ellas.

El brillo de un píxel en este canal depende de:

- La intensidad de la radiación solar.
- El ángulo de elevación solar
- La reflectividad de la superficie (albedo).

Las nubes más gruesas presentan un albedo mayor y mayor brillo en el píxel.

Las imágenes visibles son útiles para distinguir entre el mar, la tierra y las nubes. Los mares y lagos aparecen oscuros en las imágenes visibles por tener un albedo bajo. La tierra aparece más brillante que el mar, pero más oscura que las nubes.

En las nubes la brillantez del píxel depende de su albedo y este de sus propiedades físicas, fundamentalmente de su profundidad, su contenido de partículas, la naturaleza de ellas (agua o hielo) y del tamaño de estas partículas, o sea, las nubes de gran

profundidad, con alto contenido de agua, tienen un albedo alto y son más brillantes, mientras que las de poca profundidad, con bajo contenido de agua, presentan un albedo bajo y son más grises. Con igual espesor, una nube compuesta de agua se ve más blanca que una compuesta de hielo.

En las imágenes visibles, cuando el sol ilumina de forma oblicua las nubes, se pueden apreciar zonas de sombra o de brillo que ayudan en su identificación, por ejemplo la sombra proyectada por una nube más alta sobre una capa de nubes más bajas, esto indica los distintos niveles y el borde de la capa superior. En ocasiones se observa una zona de brillo intenso en el mar, producida por la inclinación de los rayos solares al incidir en la superficie, denominada sunglint.

Las imágenes VS sirven también para identificar las nieblas, humo, bruma y polvo.

Canal Infrarrojo:

En las imágenes infrarrojas se mide la radiación emitida por los cuerpos según su temperatura, es así que las nubes son más frías que la tierra y el mar y por eso emiten menos, pero para tener una imagen comparable con la visible, en las infrarrojas se invierten los valores y obtenemos que los toques más fríos de las nubes son más blancos y brillantes que los calientes de mares y tierra, que son más oscuros.

Debido a que la temperatura de los toques de las nubes decrece con la altura, las imágenes IR muestran un buen contraste entre las nubes de diferentes niveles, mientras más altas sean, más blancas se observan como los Cb y los Ci y mientras más bajas, más grises, como los Cu de poco desarrollo y los Sc.

Las líneas costeras se observan claras, solo cuando hay un buen contraste de temperatura entre la tierra y el mar. El mar presenta diferentes tonos de grises, según su temperatura.

La comparación de las imágenes VS e IR y el color, la forma y textura de las nubes en ellas ayuda a determinar los tipos de nubes con mayor precisión.

Por ejemplo:

Las nubes cumuliformes (Cu, Cc, Cb, Sc, Ac) aparecen más circulares y globulares en las imágenes de satélite, mientras que las estratiformes tienden a expandirse en capas más homogéneas.

Un Cb se verá brillante en las dos imágenes, en la VS, porque presenta alto albedo y en la IR porque, su tope es alto y frío.

Un Ci fino se verá gris en la imagen VS, porque su albedo es bajo, pero es muy blanco en la IR, porque es una nube alta y su tope es frío, pero un Ci denso puede verse blanco en la VS. Generalmente están en forma de bandas o flecos.

Los Cu de poco desarrollo son gris claro blancos (en dependencia de su desarrollo) en la VS, aunque no tanto como los Cb y son grises en la IR, porque son nubes bajas de tope más calientes. Los Cu pueden ser circulares u ovalados, estar aislados o en grupos y en forma desorganizada o en bandas o forma de cable.

Los Sc también son gris en la IR y gris claro o blanco en la VS y se diferencian de los Cu por la textura, los Sc se presentan en grupos con forma de celdas.

Las nubes medias presentan un término medio, blanco opaco, aunque son más blancas en la IR y frecuentemente son de forma moteada o aparecen junto con los Ci en forma de banda.

Los estratos son masas de textura casi homogénea, de un color uniforme y su color depende de su densidad y altura, generalmente grises en la imagen VS, aunque el Ns se observa muy blanco.

Clasificación automática de nubes

Uno de los métodos más efectivos de clasificación de nubes a partir de imágenes espectrales es el de los histogramas multidimensionales, estos son gráficos que representan la cantidad de píxeles de cada valor en forma simultánea en diferentes bandas espectrales. Como es de esperar que cada tipo de nubes, según sus características, tenga un rango de valores más o menos delimitado en cada ventana espectral, los tipos de nubes deben formar agrupaciones de puntos bien definidas que permiten delimitar zonas correspondientes a cada uno.

En las imágenes visibles los tonos de gris indican la radiación reflejada, que depende del albedo, los tonos más oscuros representan la baja brillantez y los más claros la alta

brillantez. El albedo depende de las características de la nube, sus propiedades físicas, la morfología de los toques y del ángulo de inclinación del sol. En las imágenes infrarrojas, los tonos de gris dependen de la temperatura del tope de las nubes o de la superficie para las zonas despejadas, los tonos más oscuros indican las zonas más calientes y los más claros las más frías. Esto determina la distribución de los grupos de nubes en el espacio de coordenadas definido por los valores de píxel.

Relaciones entre valores de irradiancia para distintos tipos de nubosidad

La nubosidad afecta la radiación solar que llega a la superficie de una manera muy compleja y su modelación exacta está lejos de alcanzarse. En este trabajo se aborda el problema a partir de tablas construidas con valores experimentales publicadas por Kondratyev (1969). Las tablas presentan los valores de radiación directa, difusa y global que distintos tipos de nubes dejan llegar a la superficie de la tierra en función del ángulo de altura del sol.

Descripción del modelo SIMPLE de cálculo de radiación

El modelo SIMPLE de cálculo de radiación solar directa y difusa sobre superficies horizontales e inclinadas para condiciones de cielo despejado, de los autores R. Bird y C. Riordan (1984) resulta muy conveniente para su utilización en este trabajo. Debido a que se trata de estimar la radiación sobre un área considerable y con alta resolución, el cálculo tiene que efectuarse para un gran número de puntos, y de no ser lo suficientemente sencillo, requeriría mucho tiempo de procesamiento. Por otra parte, es suficientemente riguroso para este propósito y ofrece amplias perspectivas para desarrollar este trabajo en el futuro con otras posibilidades, como la generación de valores espectrales y el cálculo para superficies inclinadas.

Las relaciones fundamentales que se aplican en el modelo SIMPLE son:

La irradiancia directa sobre una superficie normal a la dirección del sol a nivel del suelo para la longitud de onda λ esta dada por:

$$I_{s\lambda} = H_0 \tau_{0\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{u\lambda} \quad (1)$$

donde el parámetro H_0 representa la radiación solar extraterrestre en la longitud de onda λ , D es un factor de corrección por la distancia entre el sol y la tierra, T_r , T_a , T_w , T_o , T_u son respectivamente las funciones de transmisión atmosférica para la dispersión molecular (Rayleigh), los aerosoles, el vapor de agua, el ozono y el resto de los gases uniformemente mezclados.

La radiación difusa se calcula como la suma de 3 componentes:

$$I_d = I_r + I_a + I_g \quad (2)$$

Donde I_r representa la componente de dispersión molecular de Rayleigh, I_a es el aporte de la dispersión por aerosoles y I_g es la componente debida a la reflexión múltiple de la radiación entre el aire y el suelo.

Desarrollo .

Histogramas Bidimensionales.

En el presente trabajo se han construido histogramas bidimensionales para las imágenes visibles (0,52 a 0,72 μm) e infrarrojas (10,2 a 11,2 μm) del GOES 12. A pesar de que hay reportes en la bibliografía de histogramas que comprenden estos mismos rangos espectrales, estos no se ajustan a la calibración vigente en la estación receptora de imágenes de satélite del INSMET, por lo que se hizo necesario construir los histogramas haciendo un muestreo de los tipos de nubes fundamentales que afectan el flujo de radiación solar incidente en la superficie terrestre.

En la figura 1 se muestran las distribuciones de los valores de píxels VS e IR correspondientes a los tipos de nubes cumuliforme de poco y gran desarrollo, nubes medias y altas y zonas despejadas de tierra y mar, obtenidas en imágenes de los meses de julio, septiembre y noviembre del 2003 y enero, marzo y abril del 2004 con un total de 1865 casos.

El valor del píxel en las imágenes visibles se asigna en el eje de las X y el valor del píxel en las imágenes infrarrojas en el eje de las Y. El valor del píxel representa los tonos de gris en las imágenes, que van desde 0 hasta 255.

Como puede observarse en la Fig. 1, los cúmulos de poco desarrollo presentan una gran variedad en su albedo, debido a su variación en grosor y densidad, mientras que en la infrarroja en general presentan un bajo valor, porque sus topes son poco fríos, aunque cuando comienzan a presentar desarrollo convectivo se van enfriando a medida que ganan en altura, por eso se encuentran tan dispersos en el gráfico. Los cúmulos de gran desarrollo, o sea, cúmulos congestus y cumulonimbus, son nubes de desarrollo vertical, de gran densidad, por lo que son muy reflectivas y presentan un píxel con valor alto en la imagen visible, que es mayor o menor dependiendo de las características de la nube; como alcanzan niveles altos de la atmósfera, sus topes son muy fríos, por lo que presentan un alto valor del píxel en la imagen infrarroja.

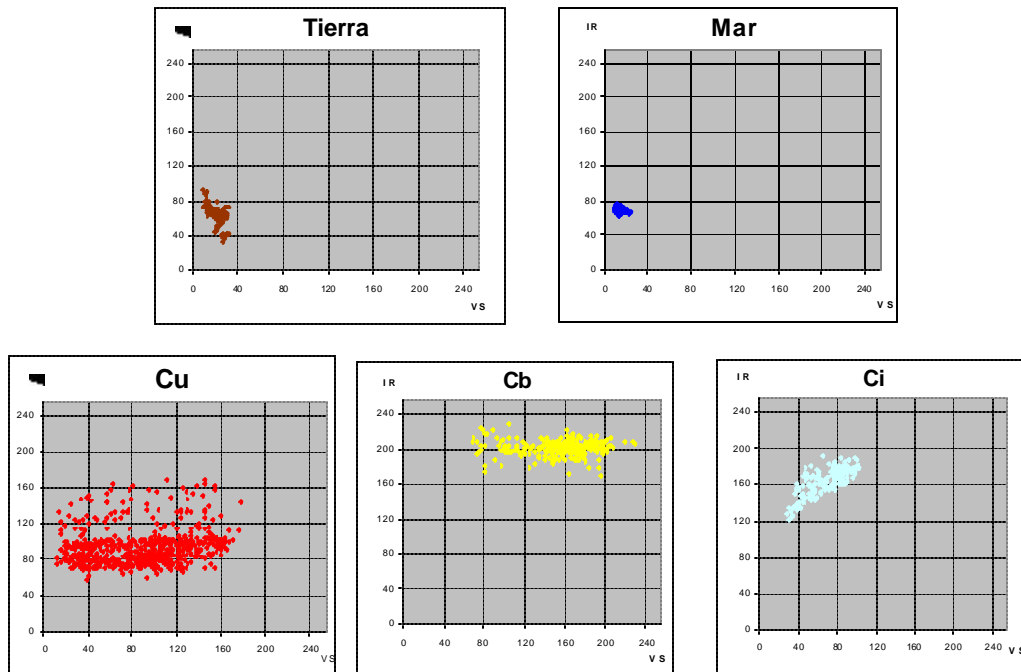


Fig. 1 Distribuciones de los pares de píxeles por tipos de nubes en el plano VS-IR

Las nubes medias y altas presentan poco desarrollo vertical, por esto se observan con un bajo valor del píxel en las imágenes visibles, pero sus topes son fríos, presentando un alto valor en la infrarroja, en la figura se observa una parte de ellas con bajos valores en la imagen IR, porque en ocasiones son tan finas que dejan pasar la radiación proveniente de la superficie y aparecen como si fueran calientes, estas nubes por lo general también tienen un bajo valor en la visible.

La superficie, tierra y mar, presenta un bajo valor en ambos ejes, por ser caliente y de menor reflectividad que las nubes y se caracteriza por tener muy poca dispersión en sus valores.

Para construir un mecanismo de clasificación automática de tipos de nubes, se elaboraron a partir de estos datos funciones de densidad de probabilidad para los distintos tipos de nubes y para las zonas despejadas, estas funciones son una medida de la probabilidad de que los valores visible e infrarrojo de un píxel correspondan a alguno de los tipos de nubes o de superficie. La clasificación se efectúa escogiendo el tipo de

nube cuya función de densidad de probabilidad sea mayor para el par de valores visible e infrarrojo correspondiente al punto en cuestión.

Las funciones de densidad de probabilidad fueron obtenidas aplicando técnicas de suavizamiento a las distribuciones de píxeles de cada tipo de nube de manera que se eliminen las fluctuaciones propias de una muestra reducida. Estas consisten en matrices de 256×256 elementos donde cada par visible–infrarrojo es proporcional a la probabilidad de que un punto en la imagen corresponda al tipo de nube en cuestión. Para evitar que los valores de las funciones de densidad de probabilidad queden pesados por el número de puntos tomados para cada tipo de nube, se normalizó su valor dividiendo por esta cantidad, de esta manera las funciones obtenidas pueden compararse entre sí para determinar qué tipo de nube tiene la probabilidad más alta para cada par posible de valores visible–infrarrojo.

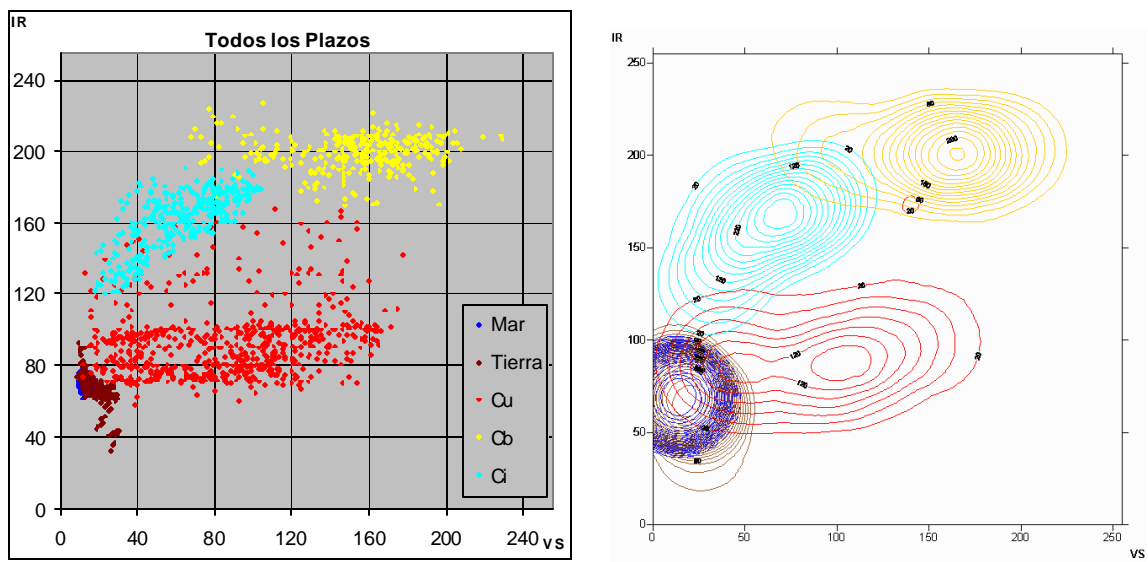


Fig 2 Distribuciones de los pares de valores de píxeles VS-IR y funciones de densidad de probabilidad, obtenidas para cada tipo de nube empleando toda la muestra.

Las funciones de densidad de probabilidad obtenidas teniendo en cuenta toda la muestra presentan en algunas regiones un grado alto de solapamiento (Fig. 2), esto es inconveniente porque en estas regiones es mayor la probabilidad de hacer una detección incorrecta del tipo de nube. Para mejorar la calidad de la detección se separó la muestra en dos intervalos como se observa en la Fig. 3, Plazo 1, que incluye los primeros plazos

de la mañana (11:00 a 15:00 UTC) y los últimos de la tarde (de 21:01 a 23:00 UTC) y Plazo 2, que comprende las horas del mediodía (de 14:01 a 21:00 UTC). En el plazo 1 está el 42 % de los casos y en el 2 el 71 %. Esto se debe a que en las horas de la tarde existe en general una mayor cubierta de nubes. Los casos entre 14:01 y 15:00 UTC se ubican en los dos plazos, para lograr un mayor número en la muestra del plazo 1 y para disminuir la discontinuidad que se produce al pasar de un plazo al otro. En la tarde el cambio no es perceptible, por lo que no se superponen los plazos.

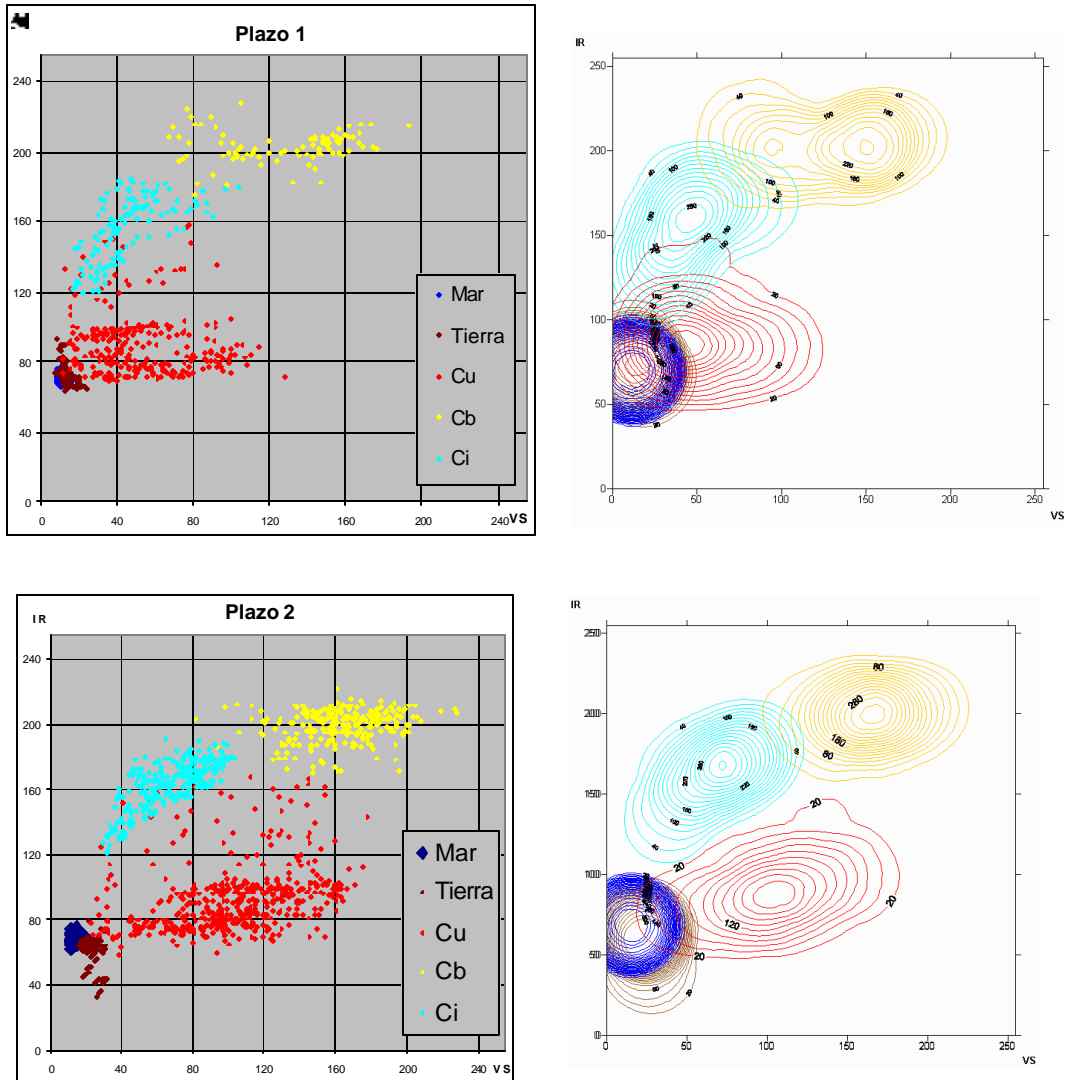


Fig 3 Distribuciones de los pares de valores de píxeles VS-IR y funciones de densidad de probabilidad obtenidas para cada tipo de nube dividida en dos plazos: Plazo 1 (11:00 a 15:00 UTC y 21:01 a 23:00 UTC) y Plazo 2 (14:01 a 21:00 UTC)

Mapas de nubes

Una vez obtenidas las funciones de densidad de probabilidad para los distintos tipos de nubes se pueden obtener los mapas con la clasificación automática de nubes a partir de las imágenes visibles e infrarrojas. En las figuras 4 y 5 se muestran una imagen visible y su mapa correspondiente.

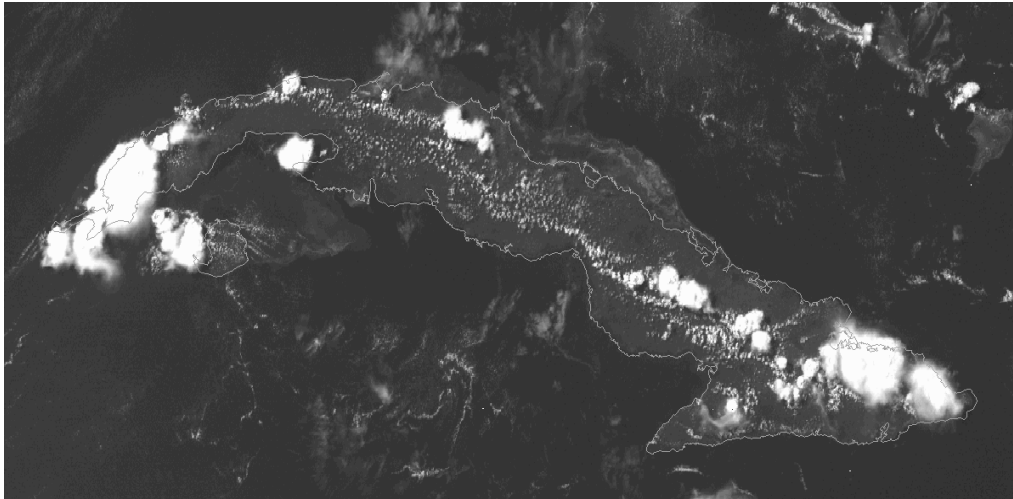


Fig 4. Imagen visible del GOES #12

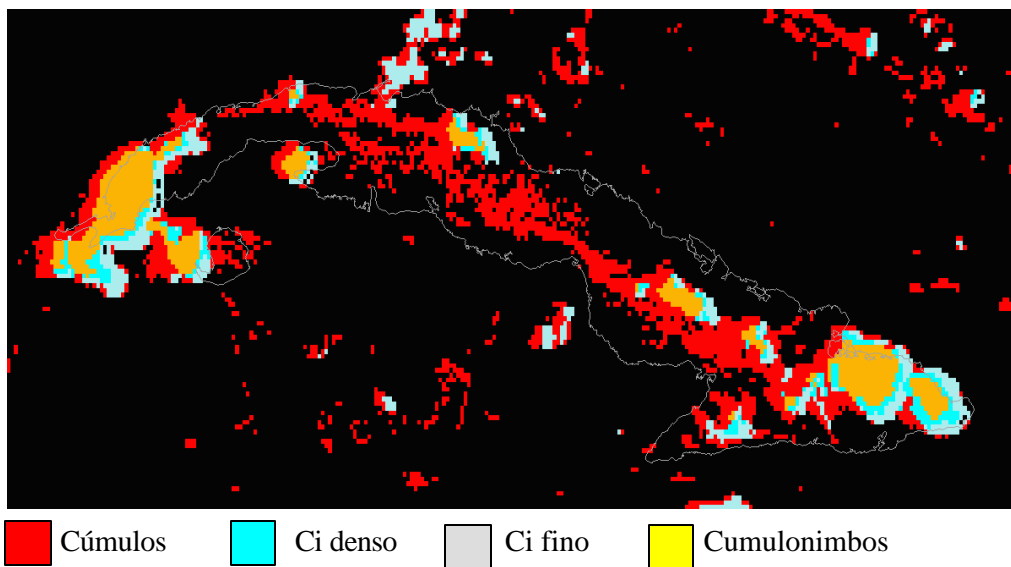


Fig. 5. Mapa de clasificación automática de nubes correspondiente a la imagen anterior.

Para obtener estos mapas el programa de cálculo lee de archivos las tablas con las funciones de densidad de probabilidad calculadas para los dos plazos determinados y a continuación permite leer los pares de imágenes visible e infrarroja. El programa hace un cotejo para comprobar que las imágenes corresponden a un mismo horario y genera un mapa de códigos de nubosidad de acuerdo a los valores de pixel de cada imagen.

Efecto de la nubosidad en el cálculo de la Radiación Solar

Como las tablas originales de Kondratiev están hechas solo hasta una altura del sol de 50° , hubo que hacer una extrapolación ajustando relaciones funcionales a los valores y evaluándolas hasta 90° , para mantener la consistencia física, las relaciones se tomaron como $\ln(R) = f(1/\sin(H))$ donde R es la radiación y H es el ángulo de altura del sol, en la fig. 6 se muestra el ajuste de la radiación ante cielo despejado y su extrapolación hasta 90°

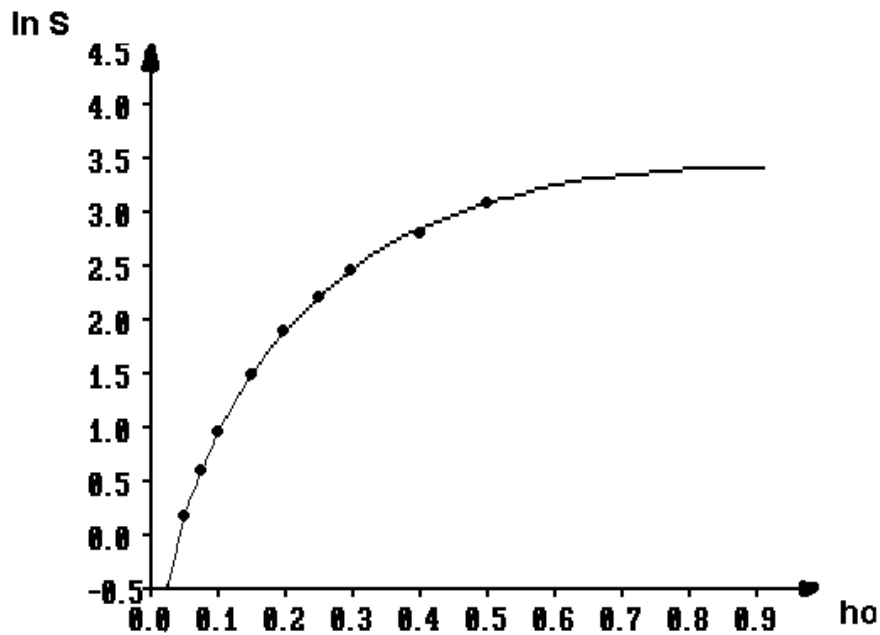


Fig. 6 Ajuste de los valores de la radiación solar ante cielo despejado reportados por Kondratyev y extrapolación hasta 90°

Los valores del coeficiente de determinación y el error standard de estimación resultaron respectivamente:

C det: 9.9996067804E-01

E std: 7.4183309627E-03

Las tablas de valores de radiación ante distintas condiciones de cobertura nubosa obtenidas a partir de las publicadas por Kondratiev y extrapoladas hasta 90° de h_o y con las relaciones entre los flujos ante distintas condiciones de nubosidad y cielo despejado se muestran en el anexo 1.

Los ajustes hechos para los distintos tipos de nubes, y para la radiación directa y difusa se muestran en la figura 7 extrapolados hasta 90° , en este caso los valores se reportan directamente en unidades de irradiancia (cal/cm^2), no como logaritmo.

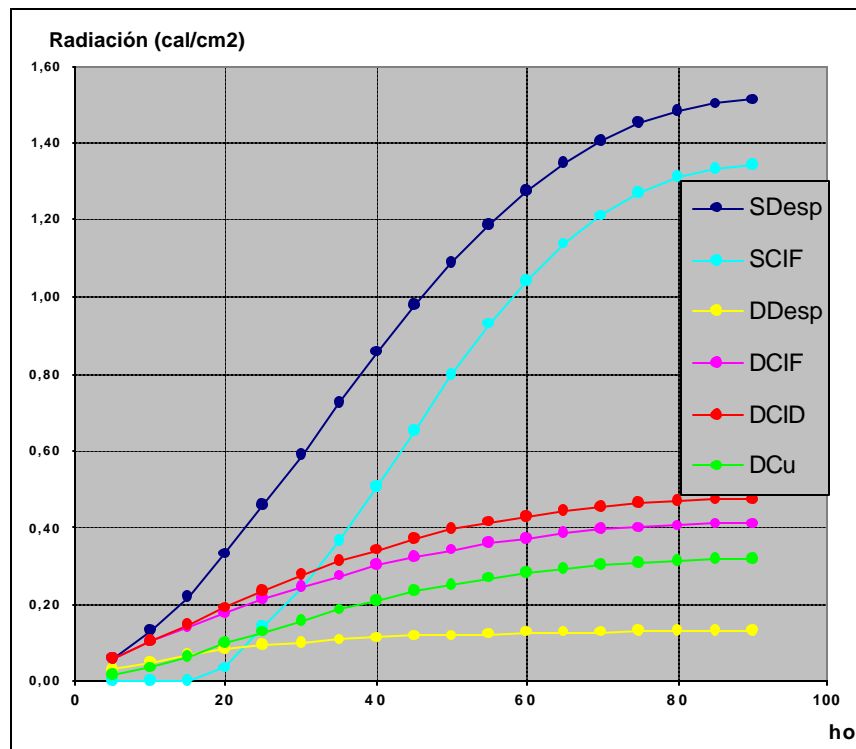


Fig. 7. Ajustes de los diferentes flujos de la radiación solar en función del ángulo de altura del sol.

Las tablas de Kondratiev incluyen los valores de radiación tanto ante cielo despejado como para distintos tipos de nubosidad, en principio pudieran utilizarse estas relaciones ajustadas como un modelo rudimentario de radiación, que ofreciera los valores de los distintos flujos en dependencia del ángulo de altura del sol. Sin embargo, para poder incorporar elementos propios de la región y la época del año como la atenuación por aerosoles o por el vapor de agua, o el efecto del albedo, es mejor utilizar un modelo físico que tenga en cuenta estos aspectos en el cálculo. Existe toda una gama de modelos disponibles en la actualidad con un grado diverso de complejidad que permiten obtener los flujos de radiación ante cielo despejado en dependencia de distintos parámetros atmosféricos. Este trabajo se propone utilizar un modelo sencillo de cálculo de flujos de radiación para cielo despejado y las relaciones entre los flujos bajo diferentes condiciones de nubosidad y ante cielo despejado obtenidas del estudio de Kondratiev para estimar la radiación bajo los distintos tipos de condiciones de nubosidad. Estas últimas se obtienen para cada pixel de la imagen de satélite por medio del mecanismo de clasificación automático descrito anteriormente. En las figuras 8 y 9 se muestran las relaciones entre los valores de radiación bajo distintas condiciones de nubosidad y ante cielo despejado.

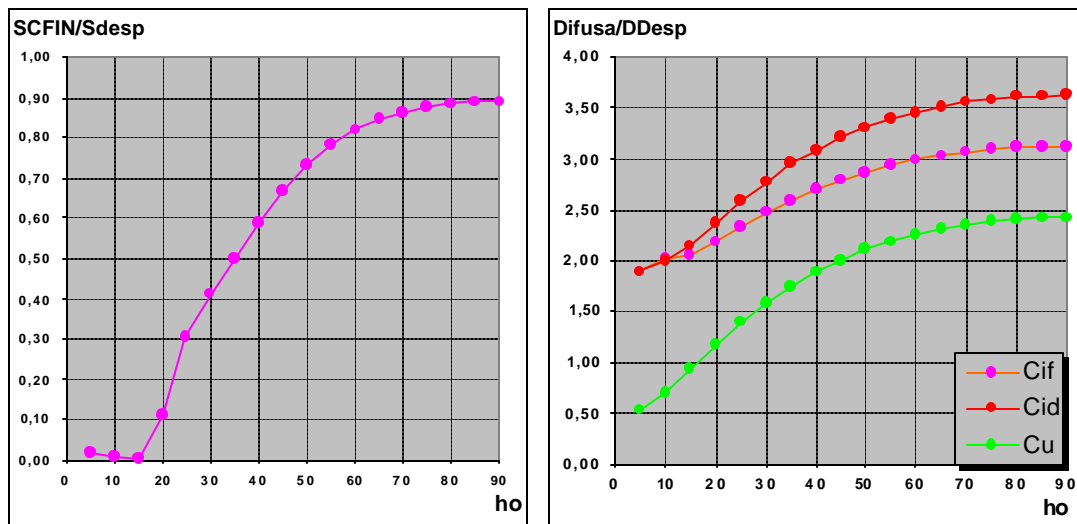


Fig. 8 y 9. Relaciones entre valores de radiación ante distintas condiciones de nubosidad con los valores ante cielo despejado. Radiación directa a la izquierda y difusa a la derecha.

Los valores de radiación para los distintos tipos de nubosidad reportados en las tablas corresponden a un grado de cobertura total, sin embargo, analizando la geometría del sistema con una resolución de 4 km por píxel y asumiendo una altura del límite inferior de las nubes de 1 km se observa que un punto sobre la superficie no queda totalmente cubierto por un solo píxel, sino que el píxel centrado sobre el punto solo cubre el 73% de la bóveda celeste, en la Figura 10 se muestran los porcentajes correspondientes a 25 píxeles en torno a cada punto, esto hace necesario tener en cuenta el aporte de cada uno de estos, pesados por su fracción de bóveda cubierta.

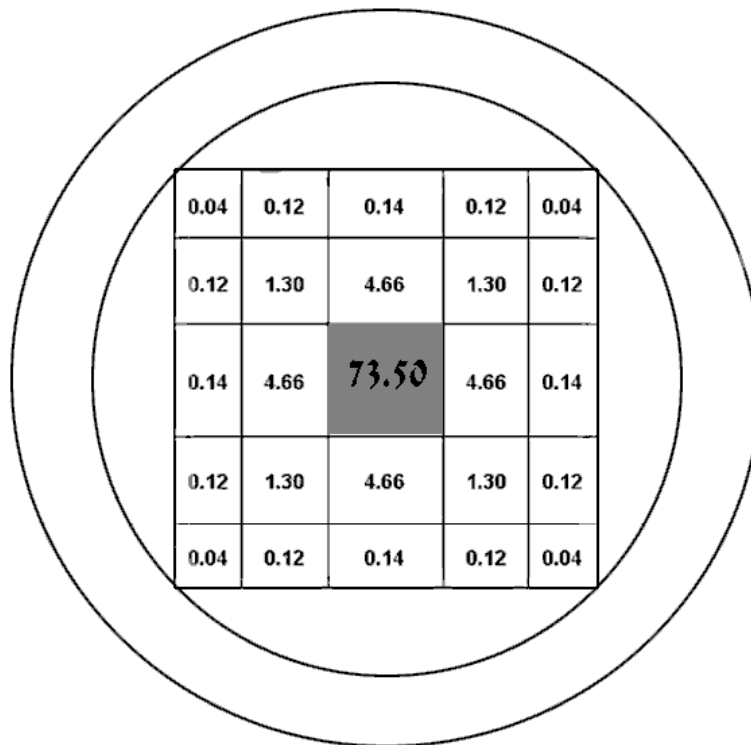


Fig. 10. Fracciones de la contribución a la radiación incidente en un punto, provenientes de las zonas cubiertas por 25 píxeles, considerando una resolución espacial de 4 Km por píxel.

Mapas de radiación solar

El programa de cálculo de radiación genera inicialmente el mapa de nubes aplicando el método de clasificación automática a las imágenes visibles e infrarrojas leídas. A continuación ejecuta el modelo SIMPLE incorporado como una subrutina. Para esta etapa del trabajo se han tomado valores medios constantes para los parámetros atmosféricos que requiere el modelo, como el espesor óptico de los aerosoles de 0.16, el contenido de vapor de agua de 1.36 cm, la temperatura media en la superficie de 27°C y un albedo medio de 0.2 para todo el espectro. Como los valores de irradiancia ante cielo despejado varían suavemente en el espacio no es necesario calcularlos para cada pixel, así se ahorra una cantidad importante de tiempo de procesamiento calculando para una malla de uno en cada 40 pixeles, haciendo una interpolación bilineal para el cálculo punto a punto.

El proceso de cálculo para cada pixel es como sigue: Primeramente se determina, según la posición angular del sol, desde qué pixel este incide, para ángulos de altura lo suficientemente grandes será el situado directamente encima del punto en cuestión, pero para ángulos más bajos puede ser alguno de sus vecinos en dependencia del azimut solar.

De acuerdo con el tipo de nubosidad atribuido al pixel señalado por la clasificación automática, se determina si hay irradiancia directa con cielo despejado, con cirros finos o no hay irradiancia directa. A continuación se calcula la irradiancia difusa de cada uno de los 25 pixeles que cubren el punto aplicando las relaciones entre irradiancia difusa bajo diferentes tipos de nubosidad y ante cielo despejado, en dependencia del ángulo de altura del sol y el tipo de nubosidad atribuido a cada uno y se suman pesándose por las fracciones de cobertura determinadas para cada uno. Así se obtiene un mapa con valores de radiación en cada pixel para el instante correspondiente a una imagen. Las imágenes de la estación de satélite tienen una frecuencia de aproximadamente 15 minutos, lo que da una buena resolución temporal para el cálculo de la suma diaria, que se hace integrando por trapecios para cada punto. El producto final es el mapa de la suma diaria en watt-hora para toda el área de la imagen que se obtiene en un archivo de salida.

Un pequeño programa auxiliar permite calcular valores medios para distintos períodos a partir de las sumas diarias.

A continuación se muestran los mapas de suma diaria de los días 16 de enero y 25 de agosto (Fig. 11) y las medias mensuales (Fig. 12), para los meses de agosto del 2003 y enero del 2004, meses típicos de verano e invierno.

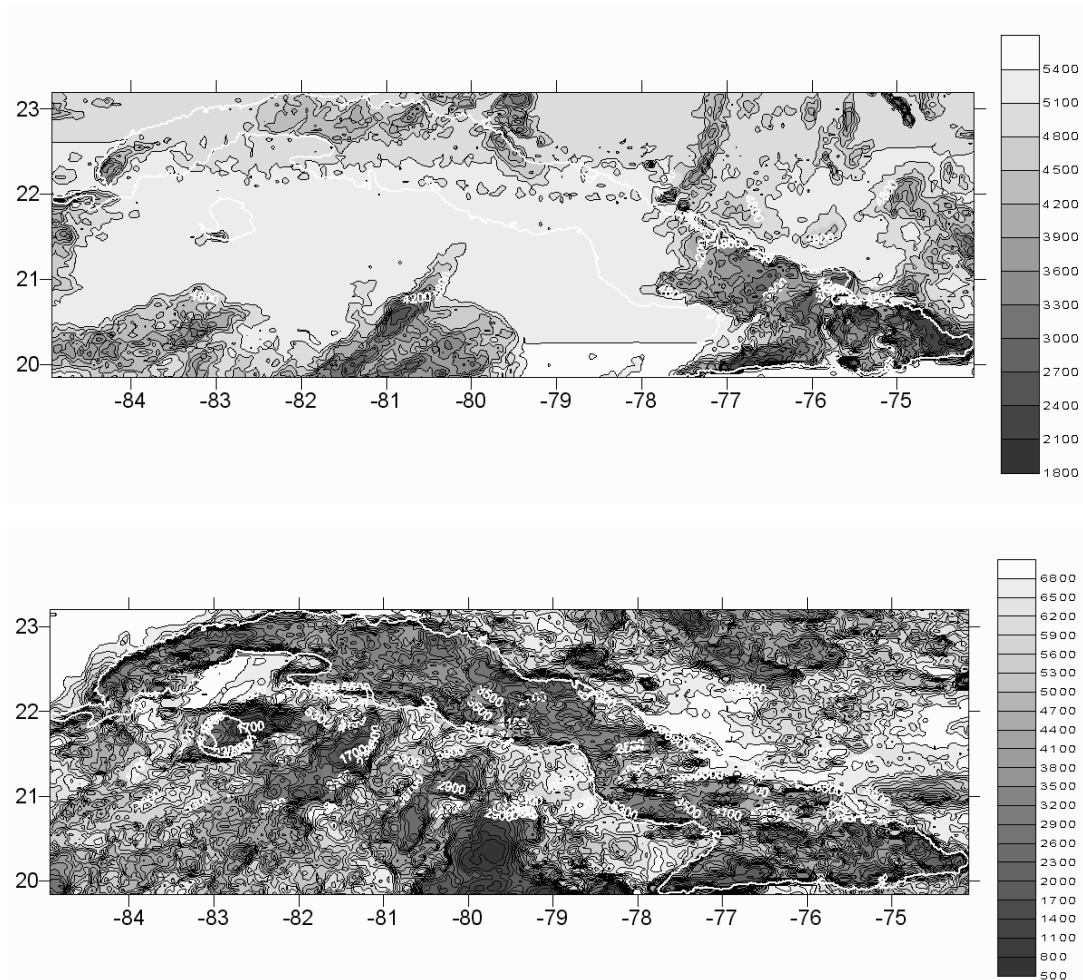


Fig. 11. Mapa de suma diaria de radiación solar global en wh/m^2 para el 16 de enero del 2004 (arriba) y del 25 de agosto del 2003 (abajo)

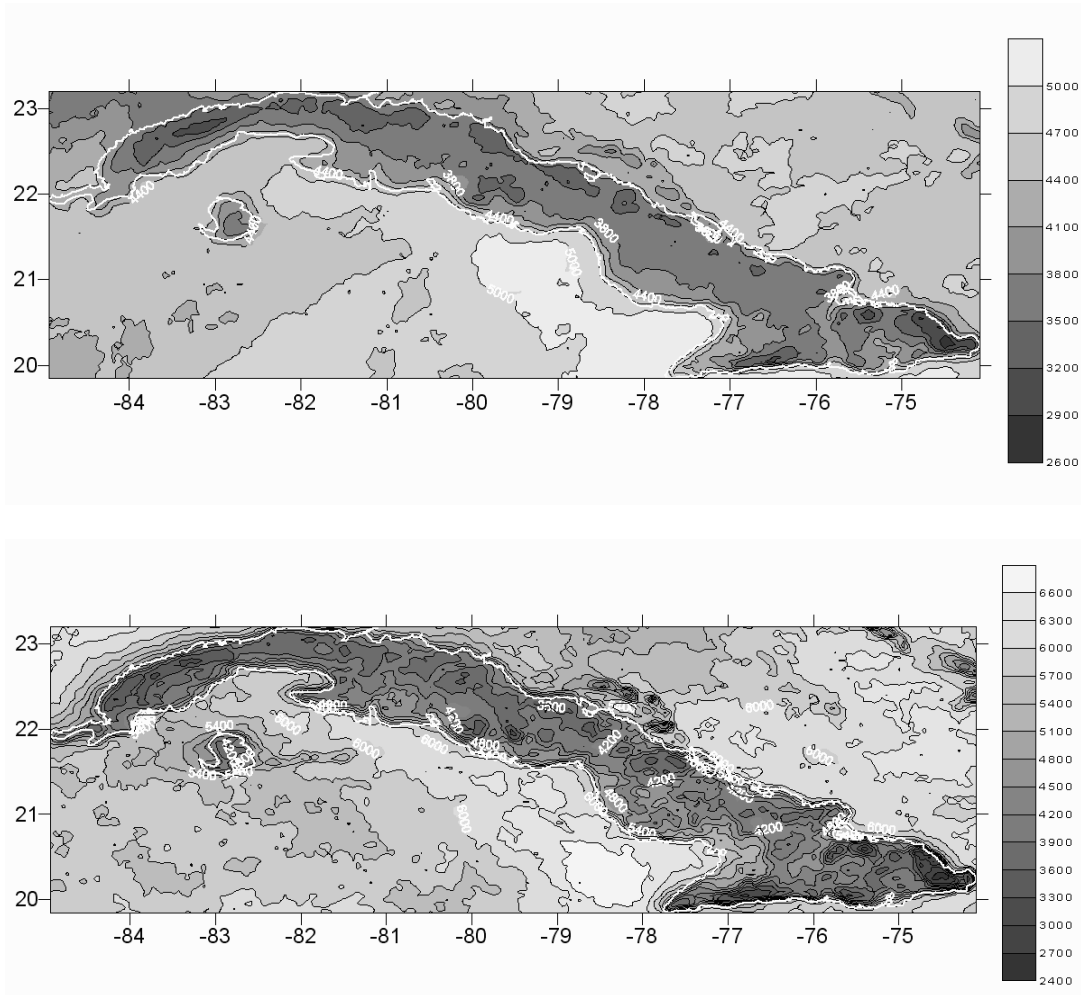
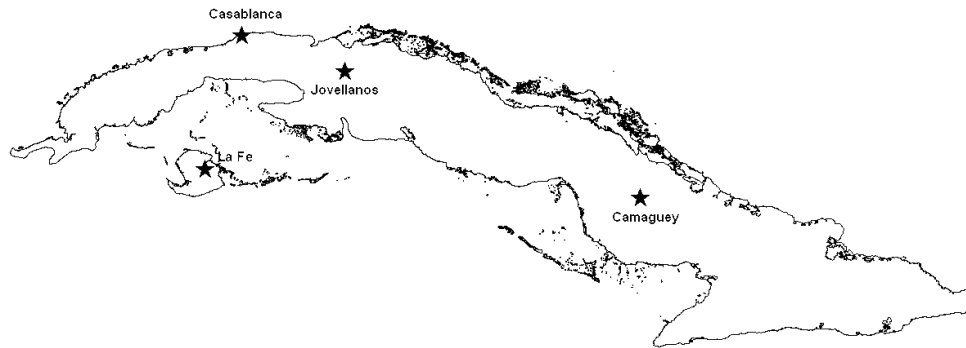


Fig. 12. Mapa medio de suma diaria de radiación solar global en wh/m2 para el mes de enero del 2004 (arriba) y el mes de agosto de 2003 (abajo).

Análisis de los resultados.

Los valores de suma diaria de radiación solar calculados por el método descrito fueron comparados con valores medidos en los meses desde julio de 2003 a enero del 2004 en 4 estaciones actinométricas instaladas en Cuba .



Las coordenadas correspondientes son:

	Latitud	Longitud
Camaguey	21.4°N	77.85°W
Casablanca	23.15°N	82.35°W
Jovellanos	22.783°N	81.183°W
La Fe	21.73°N	82.75°W

Se trata de estaciones manuales de tipo Yanishevsky que miden con un régimen horario y la suma diaria se obtiene integrando los valores puntuales por el método de los trapecios. Aunque la calidad de las mediciones fuera buena, la integración puede introducir errores debido al posible cambio de las condiciones en el intervalo entre observaciones. Otra situación a tener en cuenta es que la estación mide en un punto de la superficie, mientras que el proceso de estimación ofrece un valor medio sobre el área correspondiente a un pixel de la imagen de satélite.

A continuación se muestran los gráficos de valores medidos contra estimados por estaciones para los meses antes mencionados (Fig. 13).

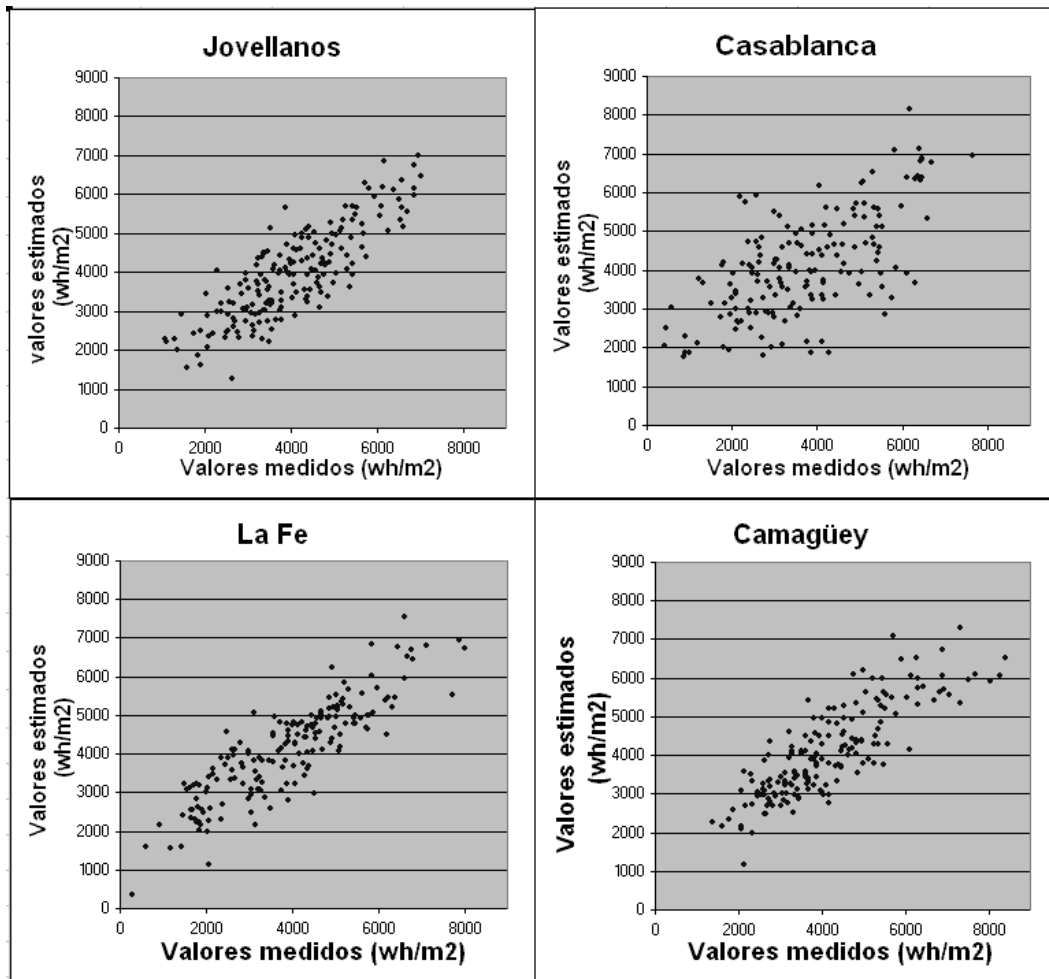


Fig. 13. Valores medidos en las estaciones contra valores estimados por satélite

Las comparaciones entre los valores de suma diaria de radiación obtenidos por el método de cálculo y los de las estaciones se hicieron tomando una media entre los valores correspondientes a los 4 píxeles más próximos a la localización de cada estación y el valor obtenido en ella ese día. Como medida de la exactitud de la estimación se tomó el error relativo en por ciento, tal como se muestra en la tabla 1, como puede observarse, en la estación de Casablanca a partir de noviembre de 2003 los errores son mayores, esto puede deberse a problemas en la estación como dificultades con las calibraciones y el funcionamiento de los equipos y errores en las mediciones y el

procesamiento. En la tabla 2 se muestran los errores relativos sin considerar estos meses.

Tabla 1. Errores relativos en % de los valores medidos .

	Camaguey	Casablanca	Jovellanos	La Fe	
Jul 03	19.9	23.3	13.2	20.4	19.2
Ago 03	22.1	16.4	19.7	19.1	19.3
Sep 03	20.2	16.7	15.5	23.6	19.0
Oct 03	18.8	19.3	19.6	18.9	19.1
Nov 03	15.4	36.9	24.9	23.7	25.2
Dic 03	19.0	44.9	20.6	22.9	26.9
Ene 04	14.7	26.1	17.2	22.2	20.1
	18.6	26.2	18.7	21.5	21.3

Tabla 2. Errores relativos en % de los valores medidos sin considerar los meses de noviembre del 2003 a enero del 2004.

	Camaguey	Casablanca	Jovellanos	La Fe	
Jul 03	19.9	23.3	13.2	20.4	19.2
Ago 03	22.1	16.4	19.7	19.1	19.3
Sep 03	20.2	16.7	15.5	23.6	19.0
Oct 03	18.8	19.3	19.6	18.9	19.1
Nov 03	15.4		24.9	23.7	21.3
Dic 03	19.0		20.6	22.9	20.8
Ene 04	14.7		17.2	22.2	18.1
	18.6	18.9	18.7	21.5	19.6

El error relativo promedio para los meses y estaciones comparados es de 21.3% o de 19.6% si no se tienen en cuenta los meses de noviembre a enero en Casablanca donde ocurren errores altos que pudieran atribuirse al funcionamiento de la estación, esta cifra de error coincide con lo reportado por Pérez y Seals (1997) en un estudio comparativo que abarca varios métodos de estimación de la radiación solar basados en imágenes de satélite y a partir de redes de estaciones en tierra, donde reporta un error relativo del 20% para los métodos de estimación por satélites con relación a los valores de las estaciones terrestres.

Conclusiones y recomendaciones

El método de cálculo de la radiación solar global desarrollado ha obtenido resultados comparables a otros métodos revisados en la bibliografía. A diferencia de muchos de estos métodos, que han sido ajustados y refinados por sus autores a lo largo de varios años de trabajo, este es completamente nuevo y parte de un enfoque diferente, por lo que tiene un gran potencial de ajuste y sintonización.

Algunos cambios que pueden sugerirse son tomar distribuciones espaciales y temporales del albedo, del índice de aerosoles y el contenido total de ozono y no valores medios constantes, lo que mejoraría el desempeño del modelo de cálculo. También puede mejorarse el mecanismo de clasificación automática de nubes teniendo en cuenta otros canales de la transmisión del satélite y hacer un estudio mas detallado de la atenuación de la radiación por los distintos tipos de nubes, basándose en las largas series de datos de las estaciones actinométricas manuales instaladas.

Es recomendable que en lo sucesivo los valores calculados se comparen con datos registrados y no con sumas diarias hechas a partir de mediciones instantáneas. Esto será posible a partir de la instalación de piranómetros con registro automático en un número importante de estaciones meteorológicas.

Bibliografía

1. Bird R. y Riordan C. (1984). Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres.
<http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/spectral/model/titlepg.html>
2. Borrajero I, et al (1989): método de cálculo de la radiación Global, difusa y directa a partir de registros heliográficos (inédito)
3. Borrajero I, et al (1990): método de cálculo de la radiación Global a partir de registros heliográficos (inédito)
4. Campos A, et al (1988): Mapas de la media de la suma diaria de la radiación global y de la suma anual de la insolación para la República de Cuba e información complementaria. Atlas Nacional de Cuba. Instituto de Geografía de Cuba, Instituto cubano de Geodesia y Cartografía. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana. Sección Clima, pp VI. 1.1.4
5. Campos A, et al 1988: Cálculo de fórmulas empíricas para los flujos de radiación solar en Cuba, Trudi III Meshdunarodnovo Simposio po Tropisheskoi Meteorologi, Leningrado, Cap VIII, pp 415, 423
6. Centro de Predicción del tiempo y estudios climáticos. INPE, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Brasil: Estimación de radiación solar por satélite.
http://www.cptec.inpe.br/satelite/metsat/radsol/info/nota_g10.htm
7. Cervino M., Levizzani V., Serafini C., Bartoloni A., Mochi M., Colandrea P. and Greco B., (1998): Cloud Detection with GOME: A refinement of the Cloud Clearing Algorithm using ATSR-2 Images. Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998.
8. Colle S., Luna de Abreu S., Couto P., Mantelli S., Bueno E., Raschke E. and Stuhlmann R. (1999): Distribution of solar irradiation in Brasil derived from geostationary satellite data. Proceedings of the Solar World. Congress ISES 1999, Jerusalem, July 4-9 1999
9. Gautier C., Diak G., Masse S. (1980): A Simple Physical Model to Estimate Incident Solar Radiation at the Surface from GOES Satellite Data. Journal of Applied Meteorology 1980, Vol. 19, N° 8, pp 1005-1012

10. Hoyos D., Cadena C., Suárez H. (2000): Sistema de medición de la irradiancia solar global. Revista Averma volumen 4 N° 8 año 2000.
<http://g.unsa.edu.ar/asades/actas2000/08-23.html>
<http://www.asrc.cestm.albany.edu/perez/strength.html>
11. Kondratiev K. (1969). Radiation in the Atmosphere. Academic Press, 912 pp.
12. Martínez L., Gimeno J. F. y Caselles V. (2000): Estudio de la precisión y tiempo de proceso en la detección nubosa mediante tres métodos. Revista de teledetección 2000, N° 14. <http://telenet.uva.es/promotores/revista/>
13. Nuevo Atlas Nacional de Cuba. 1989. Instituto de Geografía de Cuba, Instituto cubano de Geodesia y Cartografía. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana. Sección Clima, pp. VI. 1.1.4
14. Pereira E., Martins F., Abrey S., Beyer H. G., Colle S., Perez R. and Heinemann D. (2003): Cross Validation of Satellite Radiation Transfer models during SWERA Project in Brazil. Proc. ISES World Congress, Göteborg, Sweden.
15. Pérez R. and Seals R (1997): The strengths of satellite -based solar resource assessment. Proc. ASES 1997.
16. Pérez R., Incichen P., Moore K., Kmiecik M., Chain C., George R., Vignola F. (2002): A new operational model for satellite-derived irradiances, description and validation. Solar Energy 2002, Vol. 73, N° 5, pp. 307-317
17. Rigollier C., Lefèvre M., Cros S. and Wald L. (2002): Heliosat 2: An improved method for the mapping of the solar radiation from METEOSAT imagery. Proceedings of the 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. <http://www.eumetsat.de/en/index.html>
18. Rivera J. (2002): Parámetros de imagen y sinópticos en la predicción de la lluvia. Universitat Politècnica de Catalunya. Marzo 2002. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias.
<http://leslu.upc.es/cataleg/catalan.html?http://leslu.upc.es/>
19. Rivero H. (2000): Determinación de la radiación solar global a partir de imágenes de satélite GOES. Tesis presentada para la opción de master en ciencias meteorológicas Instituto de Meteorología. CITMA

20. Rodríguez G. (2002): Evaluación de un método de estimación de la radiación solar a partir de registros heliográficos en las provincias habaneras. Tesis presentada para la opción de master en ciencias meteorológicas Instituto de Meteorología. CITMA
21. Sánchez N. (2003): Panorama actual de las técnicas mixtas de clasificación de imágenes mediante segmentación espectral y por texturas. Aplicación a las imágenes de alta resolución espacial. Revista Mapping N° 88, septiembre 2003.
22. Saunders R.W. and Kriebel K.T., (1989): An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data, Int. J. of Remote Sensing, 9, 123-150.
23. Saunders, R.W., (1986): An automated scheme for the removal of cloud contamination from AVHRR radiances over Western Europe. Int. J. Remote Sens. 7, 867– 888.
24. Schulze-Kegel D. and Heidt F.D. (1996): MAPPING OF GLOBAL RADIATION WITH METEOSAT. Dept. of Physics, University of Siegen, D 57068 Siegen, Germany. Solar Energy, Vol. 58, No. 1-3, pp. 77-90, 1996
25. Vigón F. Borrajero I. Campos A. Rodríguez G, y Peláez J, C, (2001): Cálculo de la Radiación Solar sobre superficies inclinadas a partir de registros heliográficos digitalizados (inédito)
26. The ATSR Project.: A brief explanation of the ATSR cloud screening Process. <http://www.atsr.rl.ac.uk/cloudtests/index.shtml>
27. W. Möser and E. Raschke (1983): Mapping of Global Radiation and of Cloudiness from METEOSAT Image Data. Meteorol Rdsch #33, Apr 1983
28. W. Mosser and E. Raschke (1984): Incident Solar Radiation over Europe Estimated from METEOSAT Data. Journal of Climate and Applied Meteorology 1984, Vol. 23, pp. 166-170.

ANEXOS

ho	Radiación Directa							
	Despejado				Cirros finos			
	In	R	R/Sdesp	S Perpen.	In	R	R/Sdesp	S Perpen.
5	-2,80E+00	6,00E-02	1,00E+00	6,88E-01	-9,55E+03	1,00E-03	1,67E-02	1,15E-02
10	-2,03E+00	1,30E-01	1,00E+00	7,50E-01	-1,76E+02	1,00E-03	7,68E-03	5,76E-03
15	-1,51E+00	2,20E-01	1,00E+00	8,49E-01	-1,36E+01	1,00E-03	4,55E-03	3,87E-03
20	-1,10E+00	3,30E-01	1,00E+00	9,66E-01	-3,35E+00	3,59E-02	1,09E-01	1,05E-01
25	-7,82E-01	4,57E-01	1,00E+00	1,08E+00	-1,98E+00	1,40E-01	3,06E-01	3,30E-01
30	-5,25E-01	5,90E-01	1,00E+00	1,18E+00	-1,42E+00	2,42E-01	4,10E-01	4,84E-01
35	-3,20E-01	7,25E-01	1,00E+00	1,26E+00	-1,01E+00	3,64E-01	5,02E-01	6,34E-01
40	-1,56E-01	8,55E-01	1,00E+00	1,33E+00	-6,87E-01	5,04E-01	5,90E-01	7,84E-01
45	-2,31E-02	9,76E-01	1,00E+00	1,38E+00	-4,29E-01	6,52E-01	6,68E-01	9,22E-01
50	8,45E-02	1,09E+00	1,00E+00	1,42E+00	-2,30E-01	7,96E-01	7,32E-01	1,04E+00
55	1,72E-01	1,19E+00	1,00E+00	1,45E+00	-7,66E-02	9,27E-01	7,82E-01	1,13E+00
60	2,42E-01	1,27E+00	1,00E+00	1,47E+00	3,98E-02	1,04E+00	8,19E-01	1,20E+00
65	2,98E-01	1,35E+00	1,00E+00	1,48E+00	1,27E-01	1,14E+00	8,45E-01	1,25E+00
70	3,41E-01	1,41E+00	1,00E+00	1,50E+00	1,92E-01	1,21E+00	8,63E-01	1,29E+00
75	3,73E-01	1,45E+00	1,00E+00	1,50E+00	2,39E-01	1,27E+00	8,75E-01	1,32E+00
80	3,96E-01	1,48E+00	1,00E+00	1,51E+00	2,70E-01	1,31E+00	8,83E-01	1,33E+00
85	4,09E-01	1,50E+00	1,00E+00	1,51E+00	2,88E-01	1,33E+00	8,87E-01	1,34E+00
90	4,14E-01	1,51E+00	1,00E+00	1,51E+00	2,94E-01	1,34E+00	8,88E-01	1,34E+00

ho	Radiación Difusa											
	Despejado			Cirros finos			Cirros densos			Nubes bajas		
	ln	R	R/Ddesp	ln	R	R/Ddesp	ln	R	R/Ddesp	ln	R	R/Ddesp
5	-3,47E+00	3,00E-02	1,00E+00	-2,89E+00	5,68E-02	1,89E+00	-2,89E+00	5,68E-02	1,89E+00	-4,08E+00	1,59E-02	5,30E-01
10	-2,96E+00	5,09E-02	1,00E+00	-2,29E+00	1,02E-01	2,01E+00	-2,29E+00	1,02E-01	2,01E+00	-3,32E+00	3,53E-02	6,94E-01
15	-2,67E+00	6,81E-02	1,00E+00	-1,97E+00	1,40E-01	2,05E+00	-1,93E+00	1,46E-01	2,14E+00	-2,73E+00	6,41E-02	9,41E-01
20	-2,50E+00	8,10E-02	1,00E+00	-1,74E+00	1,77E-01	2,19E+00	-1,66E+00	1,91E-01	2,36E+00	-2,34E+00	9,57E-02	1,18E+00
25	-2,39E+00	9,10E-02	1,00E+00	-1,55E+00	2,12E-01	2,33E+00	-1,45E+00	2,35E-01	2,58E+00	-2,05E+00	1,27E-01	1,40E+00
30	-2,30E+00	9,91E-02	1,00E+00	-1,41E+00	2,45E-01	2,47E+00	-1,29E+00	2,75E-01	2,78E+00	-1,84E+00	1,57E-01	1,59E+00
35	-2,24E+00	1,06E-01	1,00E+00	-1,30E+00	2,74E-01	2,59E+00	-1,17E+00	3,11E-01	2,95E+00	-1,68E+00	1,85E-01	1,75E+00
40	-2,19E+00	1,11E-01	1,00E+00	-1,21E+00	3,00E-01	2,70E+00	-1,07E+00	3,43E-01	3,09E+00	-1,56E+00	2,09E-01	1,89E+00
45	-2,15E+00	1,15E-01	1,00E+00	-1,14E+00	3,22E-01	2,79E+00	-9,97E-01	3,70E-01	3,21E+00	-1,46E+00	2,31E-01	2,00E+00
50	-2,12E+00	1,19E-01	1,00E+00	-1,08E+00	3,42E-01	2,87E+00	-9,35E-01	3,94E-01	3,31E+00	-1,38E+00	2,50E-01	2,10E+00
55	-2,10E+00	1,22E-01	1,00E+00	-1,03E+00	3,58E-01	2,93E+00	-8,86E-01	4,13E-01	3,39E+00	-1,32E+00	2,66E-01	2,18E+00
60	-2,08E+00	1,24E-01	1,00E+00	-9,92E-01	3,72E-01	2,99E+00	-8,46E-01	4,30E-01	3,46E+00	-1,27E+00	2,80E-01	2,25E+00
65	-2,06E+00	1,26E-01	1,00E+00	-9,62E-01	3,83E-01	3,03E+00	-8,15E-01	4,44E-01	3,51E+00	-1,23E+00	2,91E-01	2,31E+00
70	-2,05E+00	1,28E-01	1,00E+00	-9,39E-01	3,92E-01	3,07E+00	-7,91E-01	4,55E-01	3,55E+00	-1,20E+00	3,01E-01	2,35E+00
75	-2,04E+00	1,29E-01	1,00E+00	-9,21E-01	3,99E-01	3,09E+00	-7,72E-01	4,63E-01	3,59E+00	-1,18E+00	3,07E-01	2,38E+00
80	-2,03E+00	1,30E-01	1,00E+00	-9,09E-01	4,04E-01	3,11E+00	-7,60E-01	4,69E-01	3,61E+00	-1,16E+00	3,12E-01	2,41E+00
85	-2,03E+00	1,30E-01	1,00E+00	-9,02E-01	4,07E-01	3,12E+00	-7,53E-01	4,72E-01	3,62E+00	-1,15E+00	3,15E-01	2,42E+00
90	-2,03E+00	1,30E-01	1,00E+00	-9,00E-01	4,08E-01	3,13E+00	-7,50E-01	4,73E-01	3,63E+00	-1,15E+00	3,16E-01	2,42E+00