

## ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL MEDIANTE IMAGENES METEOSAT

P. ILLERA; J.A. DELGADO y J.L. CASANOVA

Dpto. Física Aplicada I. Universidad de Valladolid. Prado de la Magdalena s/n. 47002 VALLADOLID

### RESUMEN

En el presente trabajo se utilizan imágenes analógicas o de baja resolución del satélite METEOSAT, adquiridas mediante un receptor "secundario", para realizar estimaciones de la radiación solar global. Las imágenes se digitalizan y las estimaciones se llevan a cabo a través de un modelo empírico, ajustando ecuaciones que relacionan las medidas de radiación realizadas por el I.N.M. en distintos puntos de España con el nivel de gris de las imágenes visibles, la nubosidad y el ángulo cenital del Sol. Dichas ecuaciones se utilizan para realizar estimaciones de la radiación solar global, con errores del orden de los obtenidos con los modelos que se han aplicado usando imágenes digitales.

**Palabras clave:** Radiación solar, METEOSAT, Imágenes analógicas, Modelo empírico de radiación solar.

### ABSTRACT

By means of analogue METEOSAT images, obtained from a secondary receiver, the global solar radiation has been estimated fitting the experimental values from different, I.N.M. control points in Spain to grey levels of VIS images, cloud cover and zenith angle. The errors obtained are similar to those resulting from the use of digital images.

**Key words:** Solar radiation, METEOSAT, Analogue images, Solar radiation empirical model.

## 1. INTRODUCCION

Los satélites meteorológicos que operan en bandas de la región óptica (0.3 – 3 $\mu$ m), miden la radiación solar reflejada por la superficie terrestre que emerge en la cima de la atmósfera, por lo que permiten realizar estimaciones de la radiación solar global recibida en el suelo. Dichos satélites proporcionan una resolución espacial mucho mayor que la de las redes radiométricas con las que contamos actualmente. Asimismo, los satélites geoestacionarios, como el METEOSAT, permiten obtener una excelente resolución temporal, pues registran medidas cada media hora. Así pues, la Teledetección abre una nueva perspectiva para hacer estudios zonales de radiación solar, sin necesidad de instalar costosas redes radiométricas.

La radiación se determina a partir del nivel de gris de las imágenes visibles, relacionado con la radiancia reflejada por la superficie que llega al sensor del satélite. Las imágenes corresponden a satélites geoestacionarios, por ser los que proporcionan una resolución temporal adecuada a la hora de obtener valores diarios.

Los problemas fundamentales que surgen al aplicar los modelos se deben a que, para determinar la radiación incidente en el suelo a partir de la reflejada hacia el satélite, es necesario conocer el albedo de la superficie y la atenuación atmosférica, así como la nubosidad, que interviene de una manera fundamental en la radiación solar recibida en el suelo. Por otra parte, los sensores visibles de los satélites no están calibrados. Si se quiere obtener la radiancia recibida a partir del nivel de gris de la imagen, es necesario realizar dicha calibración.

Para resolver estos problemas, se han utilizado dos tipos de modelos, aplicados siempre con imágenes digitales o de alta resolución:

**1) Modelos físicos:** La radiación solar incidente en el suelo, se determina a partir de un modelo de transferencia radiativa, mientras que las imágenes se utilizan para determinar el albedo de la superficie y la nubosidad. En general requieren datos acerca del estado de la atmósfera (distribución de gases, vapor

de agua, partículas e incluso características de las nubes) y pueden llegar a ser complicados. Como ejemplos de este tipo de modelos se pueden citar el de Gautier desarrollado en 1980 y aplicado a imágenes del satélite geoestacionario GOES de la NASA y el de Möser y Raschke de 1984 con el METEOSAT. Un problema adicional en estos casos es la necesidad de conocer la calibración de los sensores.

**2) Modelos empíricos:** Utilizan métodos de regresión para ajustar ecuaciones que relacionan la radiación global recibida en el suelo con el nivel de gris de las imágenes, la nubosidad, también determinada a partir de éstas, y otra serie de parámetros medibles que dan cuenta del efecto atmosférico, etc. Dichas ecuaciones se utilizan posteriormente para estimar la radiación global. Al utilizar directamente el nivel de gris, estos modelos no requieren el conocimiento de las constantes de calibración del sensor, aunque las ecuaciones presentan variaciones espaciales y estacionales, por lo que se debe calcular un conjunto para cada lugar y época. Como ejemplos, se pueden citar los modelos de Tarpley de 1979, aplicado a imágenes del satélite GOES y el de Cano y Wald de 1986 con el METEOSAT. Por supuesto, para obtener las ecuaciones del modelo se precisa disponer de una red radiométrica en tierra.

En este trabajo se estima la insolación a través de imágenes de baja resolución del satélite METEOSAT, recibidas y digitalizadas por nosotros mismos. Dado que nuestras imágenes no están calibradas, utilizaremos para ello un modelo empírico, que ajustaremos mediante las medidas de radiación que proporciona el I.N. de Meteorología.

## 2. LOS DATOS

La recepción y tratamiento de las imágenes de baja resolución del satélite METEOSAT, se realizan mediante un receptor mod. SERTEL-100 y un digitalizador mod. SERTEL 101, que permiten asignar a los niveles de gris valores de 0 a 255. Las imágenes digitalizadas se almacenan en un P.C. de 40 Mb de memoria, en el que se ha implementado el software necesario para realizar su tratamiento (Fernández, M., et al. 1987). En el trabajo se utilizan únicamente imágenes del canal visible (0.4 – 1.1 $\mu$ m). Considerando las características del satélite (Morgan, J., 1987) y de nuestro equipo de recepción, la resolución espacial media es de 3.4 x 3,5 km<sup>2</sup>. Finalmente, la resolución temporal de una imagen cada media hora.

En el trabajo, se utilizan imágenes del período comprendido entre el 1 de septiembre de 1986 y el 8 de abril de 1987, tomándose en promedio diez imágenes por mes. Esto conduce a un total de 74 imágenes, la mitad de las cuales se utilizan para ajustar el modelo y la otra mitad para comprobar su validez.

Para calibrar el modelo disponemos de valores horarios de la radiación solar global incidente en una superficie horizontal, medida por el I.N. de Meteorología en siete estaciones: Valladolid, Logroño, Madrid, Toledo, Ciudad Real, Cáceres y Badajoz. De esta forma, pretendemos estimar la radiación en una zona geográfica compuesta por Castilla y León, Castilla-La Mancha y Extremadura. Para localizar los puntos en la imagen se realiza su registro con un error de un pixel. Finalmente, para comparar las medidas del satélite, que son instantáneas y corresponden a un pequeño ángulo sólido, con las de los piranómetros integradas en una hora y a un ángulo sólido de  $2\pi$ , se utiliza un promedio espacial, realizando estimaciones de la radiación en zonas de 8 x 8 pixeles (Gauthier, et al. 1980).

## 3. EL MODELO

Para estimar la radiación global, se ajusta la siguiente ecuación:

$$G = a + b.\cos\theta_s + c.ngris.inub + d.hora \quad (1)$$

siendo:

- G = Radiación solar global horaria recibida en superficie horizontal, para cada estación de medida.
- $\theta_s$  = Angulo cenital del sol.
- ngris = Nivel de gris visible medio de la zona de 8 x 8 pixeles que rodea la estación de medida.
- inub = Índice de nubosidad o proporción de pixeles cubiertos en la zona de 8 x 8.
- hora = Hora solar verdadera.

Para calcular el índice de nubosidad y dado que sólo disponemos de las imágenes visibles, se utiliza el histograma de frecuencias para sus niveles de gris. De esta forma se localiza el pico de tierra y, suponiendo que se ajusta a la distribución normal, se calculan su media  $\mu$  y desviación típica  $\sigma$ . Así se determinan umbrales que permiten clasificar los pixeles de cada retículo de  $8 \times 8$  a partir de su nivel de gris  $ng$  en:

$$\begin{aligned} \text{Despejamos: } & \mu - \sigma \leq ng \leq \mu + \sigma \\ \text{Parcialmente cubiertos: } & \mu + \sigma < ng < \mu + 2\sigma \\ \text{Cubiertos: } & ng \geq \mu + 2\sigma \end{aligned}$$

y se define el índice de nubosidad  $inub$  como:

$$inub = \frac{0.5 \cdot N_2 + N_3}{N_1 + N_2 + N_3}$$

Siendo  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_3$  el número de pixeles despejados, parcialmente cubiertos y cubiertos que existen en la zona de  $8 \times 8$  considerada. Para mejorar la determinación del índice, se divide la zona de estudio en cuatro partes y se determinan los umbrales para cada una de ellas.

Por último comentar que la introducción de la hora en la ecuación (1) no hace variar apreciablemente los resultados del modelo, ya que su efecto se considera dentro del cos $\theta_s$ . El término se mantuvo simplemente porque hace aumentar ligeramente las correlaciones.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo descrito, se ajusta mediante 38 imágenes correspondientes al período que transcurre entre el 1 de septiembre de 1986 y el 8 de abril de 1987. Esto supone un total de 209 puntos. Los valores que se obtienen para las constantes de la ecuación (1), utilizando todos los valores de radiación  $G$  en  $J/cm^2$ , son los siguientes:

$$a = 81 \pm 17 \quad b = 311 \pm 14 \quad c = -0.97 \pm 0.05 \quad d = -5 \pm 1$$

El coeficiente de correlación es de 0.9151, por lo que consideramos el resultado muy satisfactorio. Por otra parte, el coeficiente  $c$  es negativo como cabe esperar, ya que para una misma nubosidad, el aumento del nivel de gris supone la existencia de nubes de mayor espesor óptico y, por lo tanto, una disminución de la radiación  $G$  recibida en el suelo.

Para comprobar la validez del modelo, se utiliza el otro conjunto de 36 imágenes y se comparan los valores de  $G$  estimados con la ecuación obtenida y medidos por I.N. de Meteorología (206 puntos). Para realizar dicha comparación, se realiza un ajuste medidas-estimaciones y se calculan la desviación media y cuadrática media. Los resultados se encuentran en la primera fila de la tabla I. Como se puede observar, la correlación entre ambos conjuntos de datos es  $r = 0.8854$ , lo que consideramos muy satisfactorio. En la figura 1, se representa gráficamente este ajuste.

Por otra parte, las desviaciones media y cuadrática media, calculadas en % de la radiación media medida, son del orden de los valores que se obtienen al estimar valores horarios, en otros modelos que aparecen en la bibliografía (Raphael y Hay, 1984). Hay que decir que estos errores disminuyen sensiblemente cuando se calculan sumas diarias y mensuales.

TABLA 1

Pendiente	Ordenada	r	s	Media	Desviación media	Desviación c. media
$1.05 \pm 0.03$	$-2 \pm 5$	0.885	35.50	124.5	-3.5%	28.51%
$1.01 \pm 0.03$	$2 \pm 4$	0.898	33.51	124.5	-2.7%	26.70%

Comparación entre medidas de la radiación solar global realizadas por el I.N.M. y estimaciones mediante la ecuación (1). Los valores de la radiación se miden en  $J/cm^2$ . En la primera fila, todas las estimaciones se realizan a través de una sola ecuación (1), mientras que en la segunda los datos se dividen en tres grupos correspondientes a cielo despejado, parcialmente cubierto y cubierto.

Para tratar de mejorar el modelo, se divide la muestra en tres partes, considerando el cielo despejado para valores del índice de nubosidad menores de 0.3, parcialmente cubierto para índices entre 0.3 y 1 y totalmente cubiertos si el valor es la unidad. De esta forma se obtienen tres conjuntos de coeficientes para la ecuación (1), con la única salvedad de que en los casos parcialmente cubierto y cubierto se puede ignorar la influencia de la hora y no se ajusta el coeficiente  $d$ . En la segunda fila de la tabla I, aparecen los resultados que se obtienen al comprobar la validez del modelo con el segundo grupo de imágenes. Como se puede observar, la correlación entre los dos conjuntos de datos aumenta y se obtienen mejores valores para los errores.

En la figura 2 se representan gráficamente los ajustes medidas-estimaciones obtenidos si se consideran los valores de cielo despejado, parcialmente cubierto y cubierto por separado. Todos los datos siguen midiéndose en  $J/cm^2$ . En los casos despejado y parcialmente cubierto se obtienen buenas correlaciones, mientras que en el caso totalmente cubierto las predicciones empeoran sensiblemente.

Para terminar, en la figura 3 se presenta el histograma de desviaciones entre medidas y estimaciones obtenidas aplicando el modelo en la última forma descrita.

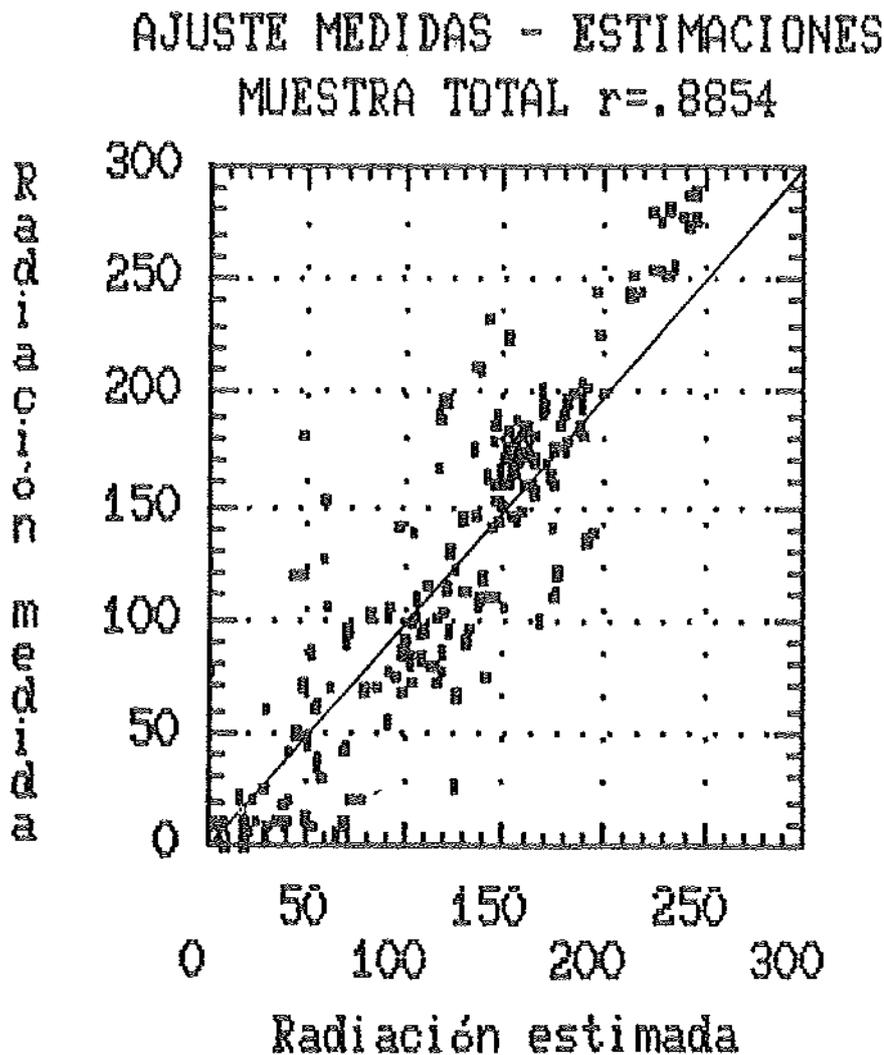


Figura 1.— Comparación entre valores horarios de insolación medidos por el I.N. de Meteorología y estimados con la ecuación (1). Se ajusta una ecuación válida para todo tipo de condiciones de nubosidad. La insolación se mide en  $J/cm^2$ .

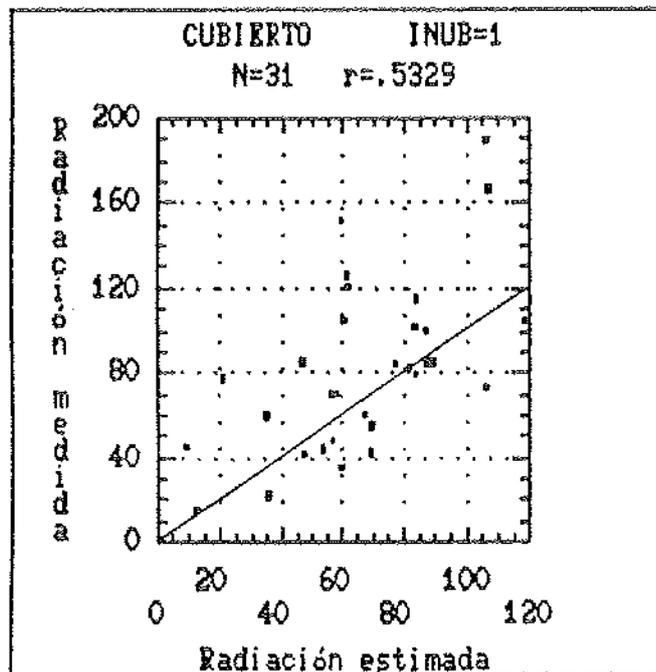
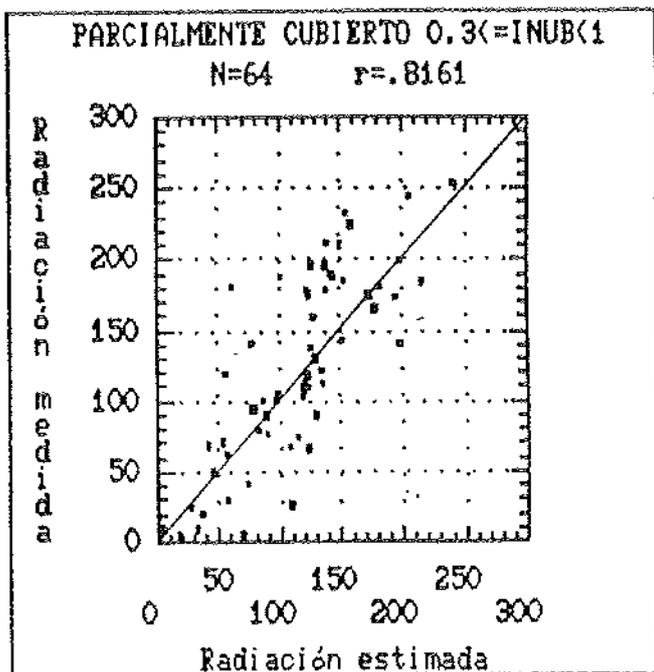
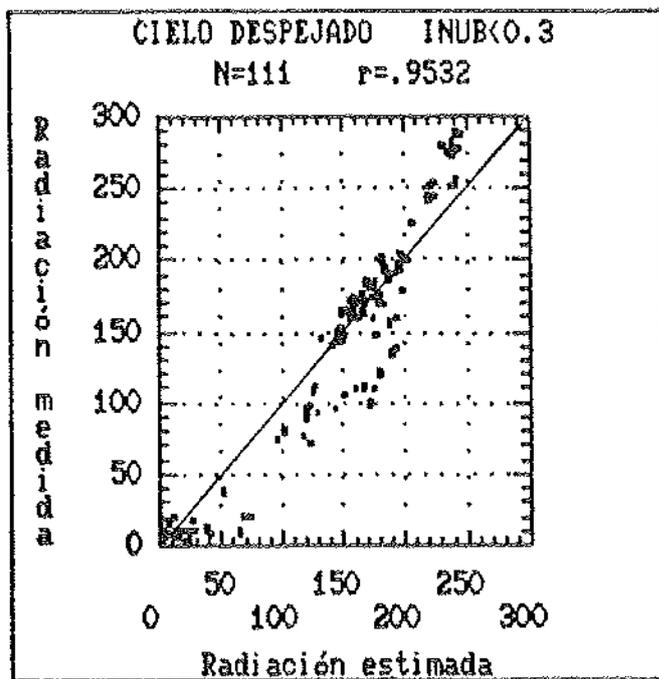


Figura 2.— Lo mismo que la anterior si se divide la muestra en casos de cielo despejado, parcialmente cubierto y cubierto ajustándose una ecuación para cada caso.

## 5. CONCLUSIONES

Hemos elaborado un modelo de estimación de la radiación solar global, que a través del ajuste de una ecuación relativamente sencilla, por lo que no es necesario disponer de un gran número de puntos, nos permite obtener resultados con errores del orden de los que se encuentran en otros modelos que realizan este tipo de estimaciones. Las correlaciones entre medidas y estimaciones son también muy satisfactorias, en los casos de cielo despejado y parcialmente cubierto.

Para los pixeles totalmente cubiertos, el modelo proporciona peores resultados. Pensamos que esto puede solucionarse, introduciendo también las imágenes infrarrojas, que nos permitirán hacer un mejor estudio de las nubes.

Finalmente, todos los resultados se han obtenido utilizando imágenes analógicas, recibidas mediante una estación secundaria y posteriormente digitalizadas. Las altas correlaciones que presenta en todos los casos el ajuste de la ecuación (1) y los resultados obtenidos con el modelo, nos permiten pensar que dichas imágenes se pueden utilizar en este tipo de estimaciones, lo cual presenta la indudable ventaja del bajo coste del estudio.

### HISTOGRAMA DE ERRORES ABSOLUTOS

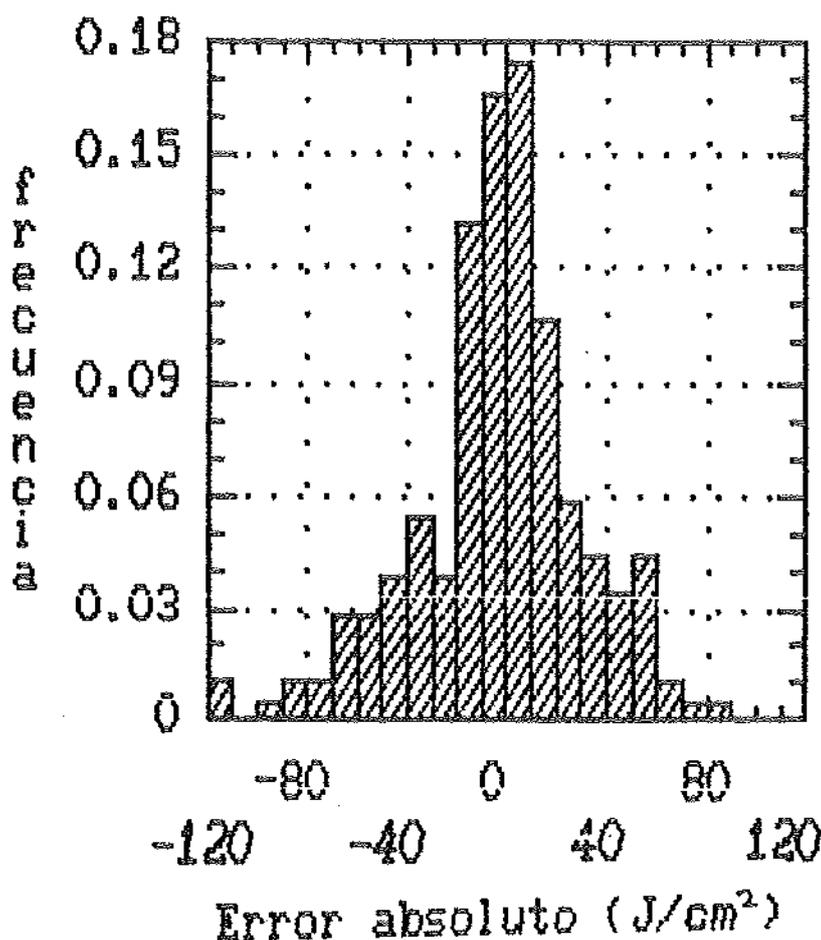


Figura 3.— Histograma de desviaciones entre valores de la radiación solar horaria medida por el I.N. de Meteorología y estimada a través de nuestro modelo. Para ajustar la ecuación (1) se divide la muestra en casos despejados, parcialmente cubiertos y cubiertos.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al I.N. de Meteorología el haber puesto a su disposición los datos de radiación global horaria utilizados en el trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

- Cano, D., et al. 1986. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. **Sol. Energy.** **37**: 31-39.
- Fernández M., et al. 1987. Un sistema para la recepción y tratamiento digital de imágenes de satélites meteorológicos. **En XXI Reunión Bienal de la R.S.E.D.F.:** 371-372 Salamanca.
- Gautier R.C.; Diak, G. and Masse, S. 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. **J. Appl. Meteorol.** **19**: 1.005-1.012.
- Morgan J., 1978. **Introducción to the METEOSAT system.** M.D.M.D., E.S.O.C., Darmstadt. F.R.G.
- Moser, W. and Raschke, E. 1984. Incident solar radiation over Europe estimated from METEOSAT data. **J. Climat. Appl. Meteorol.** **23**: 166-170.
- Raphael, C. and Hay, J.E. 1984. An assesment of models wich use satellite data to estimate solar irradiance at the earth's surface. **J. Climat. Appl. Meteorol.** **23**: 832-844.
- Tarpley, J.D. 1979. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. **J. Appl. Meteorol.** **18**: 1.172-1.181.

