

## ESTIMACIÓN DE VALORES HORARIOS DE RADIACIÓN DIRECTA MEDIANTE TELEDETECCIÓN

M. A. RUBIO (\*), G. LOPEZ (\*\*), POZO, D. (\*\*\*), TOVAR, J. (\*\*\*), F. J. BATLLES (\*)

mrubio@ualm.es

(\*) Dpto. Física Aplicada, Universidad de Almería. 04120, Almería

(\*\*) Dpto. de Física Aplicada e Ingeniería Eléctrica, Universidad de Huelva, 21819, Huelva.

(\*\*\*) Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Jaén, 23071, Jaén.

**RESUMEN:** Un conocimiento preciso de la radiación solar incidente en la superficie es fundamental en la mayoría de las aplicaciones de la energía solar. Mediante la teledetección podemos obtener medidas de radiación con una alta cobertura espacial y una alta resolución temporal. En este trabajo presentamos un método para predecir la irradiancia directa a partir de medidas de teledetección. Estimamos la radiación directa en condiciones de cielo despejado mediante un modelo paramétrico y posteriormente lo corregimos con un esquema de transmitancia que tenga en cuenta el efecto de las nubes. La capas de nubes se ha determinado a partir de las medidas de la radiancia medida por Meteosat.

**ABSTRACT:** With an increasing number of solar applications the need for solar radiation data has become more important. Using remote sensing data we can obtain radiation measurements with high temporal coverage and spatial resolution. In this paper we present a method that calculates direct irradiance from space observations. We first calculate the cloudless sky global radiation and then amend it for the effect of the clouds. This is achieved using a combination of an appropriate clear sky parametric model with an appropriate cloud transmission function. Cloud amount has been calculated from radiance measured by Meteosat.

**Palabras clave:** teledetección, radiación solar, radiación directa, energía solar, recursos energéticos solares.

### INTRODUCCIÓN

La irradiancia directa normal es una variable muy importante en la evaluación del funcionamiento de centrales solares de producción de energía y, en general, de cualquier sistema que concentre la radiación solar. Por desgracia en la actualidad sólo se disponen de medidas de radiación directa en zonas muy localizadas. Esto dificulta la correcta evaluación de los recursos energéticos solares ya que normalmente no se dispone de series de medidas de irradiancia directa en la zona de interés. Este hecho también dificulta la estimación del potencial energético solar en zonas extensas, ya que en general no se conoce cual es la variabilidad espacial de la radiación solar (Gautier, 1981).

La posibilidad de obtener una estimación de la radiación directa a partir de imágenes de satélite, ampliaría considerablemente la información disponible ya que las imágenes de satélite proporcionan información de cualquier punto de la superficie y con una frecuencia adecuada (Broesamle *et alii*, 2001).

Para una correcta estimación de la irradiancia directa es fundamental una buena comprensión de los distintos procesos que se dan cuando la radiación solar interacciona con la atmósfera. Entre los diversos factores que atenúan la irradiancia directa el tamaño y la distribución de la capa de nubes es uno de los más relevantes.

El método que hemos utilizado para predecir la irradiancia directa consiste en estimar la radiación directa en condiciones de cielo despejado mediante un modelo paramétrico, y luego corregir este valor teniendo en cuenta el efecto de la capa de nubes mediante un esquema de transmitancia adecuado (Alados *et alii*, 1996). La cantidad de nubes presentes se ha determinado a partir de la radiancia medida por el satélite.

### DATOS EXPERIMENTALES

Los datos utilizados en este trabajo comprenden imágenes Meteosat de alta resolución y valores horarios de irradiancia directa normal tomadas en los meses de

abril mayo y junio de 2000 en la localidad de Almería. Las imágenes Meteosat seleccionadas para este trabajo han sido cedidas por la Universidad de Jaen. Se han utilizado grupos de 2\*2 píxeles en torno a la estación de tierra. La calibración de las medidas se realizó siguiendo el esquema propuesto por Kriebel (Kriebel *et alii*, 1995).

Las medidas de irradiancia utilizados en este trabajo son valores horarios de irradiancia directa obtenidos a partir de las medidas registradas en la estación radiométrica localizadas en la Universidad de Almería (36.83°N, 2.41°W). Los valores de irradiancia directa se obtuvieron a partir de medidas de irradiancia global y difusa.

Tanto para la medida de radiación global como de radiación difusa se utilizaron piranómetros Kipp&Zonnen modelo CM-11, uno de los cuales lleva incorporada una banda de sombra. Las medidas realizadas con banda de sombra se han corregido mediante el método propuesto por (Battles *et alii*, 1995).

**DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

En este trabajo el método que hemos utilizado para calcular la radiación directa consiste en estimar la radiación directa en condiciones de cielo despejado mediante un modelo paramétrico adecuado y luego modificar el valor obtenido teniendo en cuenta el efecto de la cubierta de nubes mediante un esquema de transmitancia. (Alados *et alii*, 1996)

Para estimar la radiación directa en cielos despejados hemos utilizado el modelo paramétrico propuesto por Gueymard (Gueymard, 1989). Para tener en cuenta el efecto de las nubes hemos usado dos esquemas de transmitancia distintos. Ambos utilizan medidas de nubosidad obtenidas a partir de imágenes de Meteosat.

**Cálculo de la irradiancia directa en cielo despejado**

Gueymard modelizó la irradiancia directa en incidencia normal mediante la división del espectro electromagnético en dos bandas. La banda del ultravioleta-visible (0.29-0.7 µm) denominada B1 y la banda del infrarrojo (0.7-2.7 µm) denominada B2.

El modelo propuesto por Gueymard viene dado por la siguiente ecuación:

$$I_{ni} = \tau_{oi} \tau_{ri} \tau_{gi} \tau_{wi} \tau_{ai} I_{oni}$$

Donde  $I_{oi}$  es la irradiancia extraterrestre normal para esa banda y las distintas  $\tau$  son las transmitancias de banda ancha para cada uno de los procesos que intervienen,  $\tau_{oi}$  es la transmitancia por ozono,  $\tau_{ri}$  es la transmitancia por Rayleigh,  $\tau_{ai}$  la transmitancia por aerosoles,  $\tau_{gi}$  es la transmitancia por gases y  $\tau_{wi}$  es la transmitancia por vapor de agua (Gueymard, 1989).

Para cada una de las bandas la irradiancia directa normal viene dada por el producto de la constante solar en esa banda por las transmitancias de cada uno de los procesos de interacción que se dan en la atmósfera.

La irradiancia directa normal se obtiene como la suma de la contribución de cada banda.

$$I_n = I_{n1} + I_{n2}$$

**Esquema de transmitancia de la capa de nubes**

Para determinar la contribución de la capa de nubes a partir de las medidas de satélite hemos tenido en cuenta que cuando hay nubes la señal que recibe el sensor del satélite es mayor que la que se detectaría en condiciones de cielo despejado.

Este hecho nos va a permitir estimar la cantidad de nubes presentes mediante la comparación de los valores de radiancia medida por satélite con la radiancia que mediría en condiciones de cielo despejado (Stuhlmann *et alii*, 1990).

Para calcular la radiancia que mediría el sensor del satélite en una atmósfera sin nubes se ha utilizado el código LOWTRAN-7 (Kneizys *et alii*, 1988) que permite calcular magnitudes relacionadas con la transferencia radiativa en la atmósfera a partir de datos de entrada procedentes de fuentes de teledetección o climatológicas. En las simulaciones se ha tenido en cuenta el intervalo espectral correspondiente al canal visible del satélite Meteosat (0.5-0.9 µm) y la respuesta espectral del sensor (Eumesat, 1996).

A partir de la radiancia medida por satélite y la radiancia simulada mediante LOWTRAN-7 calculamos la radiancia directa sobre la superficie a partir de la siguiente expresión

$$I = I_t \left( 1 - \frac{L_{sat} - L_{Low}}{L_{max}} \right)$$

Donde  $I$  es la irradiancia normal directa,  $I_t$  es la radiancia teórica obtenida por el modelo de Gueymard,  $L_{sat}$  es la radiancia medida por el satélite,  $L_{Low}$  es la radiancia que mediría el satélite en condiciones de cielo despejado calculado mediante LOWTRAN-7 y  $L_{max}$  es la radiancia máxima que recoge el satélite (Stuhlmann *et alii*, 1990).

Este modelo, a partir de ahora modelo 1, nos da el valor de irradiancia del modelo de Gueymard cuando la radiancia medida por satélite coincide con la calculada mediante LOWTRAN-7 y va disminuyendo a medida que aumenta la radiancia medida por el satélite.

Una cualidad importante de este modelo es que no se realiza ningún tipo de regresión por lo que el modelo no incluye variables locales y podría ser utilizado sin ninguna modificación en otras localidades.

Al observar un cierto comportamiento bimodal de la radiación directa frente al tamaño de la cubierta de nubes decidimos estudiar la eficacia de un ajuste sigmoidal de la irradiancia directa respecto a la razón  $L_{sat} / L_{max}$ . Encontramos que los mejores resultados se obtenían con una expresión de la forma:

$$I = I_t \frac{1}{1 + e^{b(L_{sat} / L_{max} - a)}}$$

Donde a y b son parámetros que se ajustan mediante una regresión no lineal. Este modelo, a partir de ahora modelo 2, presenta la ventaja de que no necesitamos simular la radiación que recibe el satélite en condiciones de cielo despejado, pero al incluir dos parámetros de ajuste el modelo es local obteniéndose distintos parámetros para cada localidad.

### RESULTADOS

Hemos estudiado la validez de los modelos comparando los valores de irradiancia directa estimados por los modelos con medidas realizadas en la superficie.

En la tabla 1 se presenta la desviación media (MBE) y el error cuadrático medio (RMSE) de los modelos propuestos en este artículo. La desviación media da cuenta de la tendencia del modelo a la desviación sistemática y el error cuadrático medio nos informa de las diferencias entre los valores experimentales y los estimados por el modelo. Los errores vienen dados en tanto por ciento respecto a valor de la irradiancia directa media, cuyo valor es 620 W/m<sup>2</sup>.

Estudiando los resultados del modelo 1 se observa que el error medio es un -0.9%, es una desviación relativamente pequeña por lo que se puede afirmar que el modelo no presenta una desviación sistemática clara. El error cuadrático medio del modelo 1 es del 28.2%.

Los errores obtenidos por el modelo 1 son del orden de magnitud de los obtenidos cuando se utilizan observaciones desde tierra de la cubierta de nubes. La principal fuente de error es la gran dispersión que presentan los datos de radiación directa debido a la importancia de la posición relativa entre el disco solar y las nubes. También es una fuente de error el hecho de que estemos usando valores mensuales de contenido de aerosoles ya que esta variable influye en gran medida en la cantidad de irradiancia directa que incide sobre la superficie.

	MBE	RMSE
<b>Modelo 1</b>	-0.9%	28.2%
<b>Modelo 2</b>	1.2%	25.8%

Tabla 1. Resultados estadísticos los modelos.

Si comparamos los resultados del modelo 2 con los del modelo 1 se observa que el modelo 2 presenta unos errores cuadráticos medios menores que los del modelo 1, un 25.8% frente al 28.2%. Esta mejora se debe en parte al hecho de que tenemos dos parámetros libres para ajustar mientras que en el modelo 1 no se ajustaba ningún parámetro. El error medio es del 1.2%, por lo que de nuevo se puede afirmar que el modelo no presenta una desviación sistemática de importancia

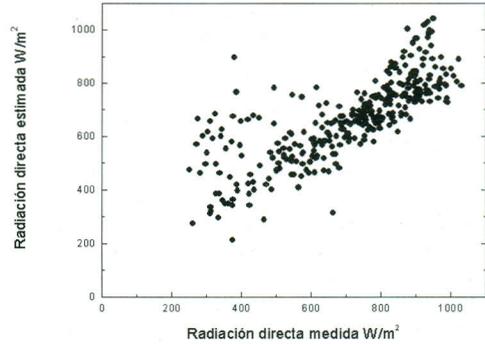
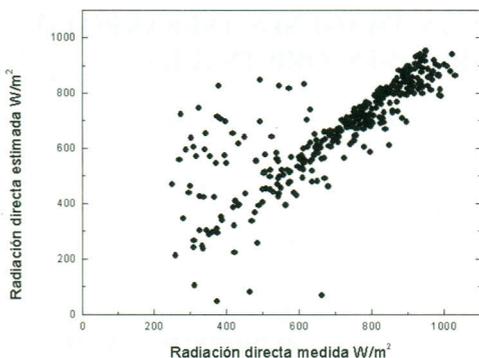


Figura 1. Irradiancia directa medida frente a la calculada por el modelo 1.

En la figura 1 se puede observar que el modelo 1 funciona correctamente en condiciones de cielo despejado, mientras que falla sobre todo para valores de irradiancia directa medida por debajo de los 500 W/m<sup>2</sup>, valores asociados mayoritariamente a la presencia de una capa de nubes. Estos errores se deben sobre todo a que nuestro modelo no tiene en cuenta la posición relativa del sol con la cubierta nubosa, factor muy importante en el caso de la radiación directa.

En la figura 2 se muestra la gráfica de la directa medida en superficie frente a la directa estimada por el modelo 2. Se observa que la mayoría de los puntos se alinean a lo largo de una línea próxima a la diagonal de coincidencia entre el valor medido y el valor estimado.

Los puntos que están por encima de esa línea son casos en los que hay una cubierta de nubes parcial y el disco solar está oculto por una nube, en este caso la radiación directa que se recibe es la que se recibiría si el cielo estuviese completamente cubierto por nubes pero la medida del satélite detecta sólo el tamaño de la cubierta por lo que el modelo estima excesivamente la radiación directa.



**Figura 2.** Irradiancia directa medida frente a la calculada por el modelo 2.

## CONCLUSIONES

En este trabajo hemos estimado valores horarios de la irradiancia directa a partir de medidas realizadas por el satélite Meteosat. El método que hemos desarrollado utiliza un modelo paramétrico de cielo despejado y un esquema de transmitancia de nubes en el que se utilizan las medidas obtenidas a partir de las imágenes Meteosat y los resultados del código de transferencia radiativa LOWTRAN-7.

De los dos modelos que hemos estudiado el modelo 2 es el que presenta menor error pero con la contrapartida de que utiliza parámetros que se deben ajustar para cada localidad. El modelo 1 al no ser un modelo local puede ser utilizado en cualquier zona sin necesidad de ningún ajuste.

Los errores obtenidos se deben por un lado a la falta de información sobre la distribución y cantidad de aerosoles en la atmósfera y por otro a la fuerte dependencia que presenta la irradiancia directa respecto a la

posición relativa del disco solar y la capa de nubes. Esto último se refleja en el hecho de que los errores obtenidos en nuestros modelos son del mismo orden que los obtenidos con modelos que utilizan información de la cubierta de nubes tomada en la superficie.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALADOS, I., FOYO MORENO, I., ALADOS ARBOLEDAS, L., 1996. Photosynthetically Active Radiation: Measurements and Modelling. *Agric. For. Meteorol.*, vol. 78: 121-131.
- BATLLES F. J., OLMO, F. J., ALADOS ARBOLEDAS, L., 1995. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements". *Solar Energy*, vol. 54: 115-124.
- BRÖESAMLE H., MANNSTEIN H., SCHILLINGS C. and TRIEB F. 2001. Assessment of solar electricity potentials in North Africa Based on satellite data and a geographic information system *Solar Energy*, vol. 70: 1-12.
- GAUTIER, C., 1982. Mesoscale Insolation Variability Derived from Satellite Data. *J. Appli. Meteor.* vol. 21: 51-58.
- GUEYMARD, C., 1989. A two band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface. *Solar Energy*, vol. 43:253-265
- KNEIZYS, F. X., et al., 1988. Users guide to LOWTRAN 7. *Air Force Geophys. Lab., Hascom, MA, Report AFGL-TR-88-0177.*
- KRIEBEL, K.T., MANNSTEIN, H., AMANN, V., 1995. Absolute calibration of the Meteosat-5 visible channels. *EUMESAT.*
- STUHLMANN, R., RIELAND, M., RASCHKE, E., 1990. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *J. Appli. Meteor.* vol. 29:586-603.