

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN GLOBAL DIARIA EN ZONAS DE TOPOGRAFÍA COMPLEJA UTILIZANDO MODELOS DIGITALES DEL TERRENO E IMÁGENES DE METEOSAT: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

Batlles, F. J.⁽¹⁾, Zarzalejo, L. F.⁽²⁾, Rosiek, S.⁽¹⁾, Polo, J.⁽²⁾, Martínez-Durbán, M.⁽³⁾, Ramírez, L.⁽²⁾, Bosch, J. L.⁽¹⁾, Espinar, B.⁽²⁾, Pozo, D.⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Dpto. Física Aplicada. Universidad de Almería. 04120 Almería. e-mail: fbatlles@ual.es

⁽²⁾ Dpto. Energías Renovables, CIEMAT, 28040. Madrid. e-mail: lf.zarzalejo@ciemat.es

⁽³⁾ Dpto de Lenguajes y Computación. Universidad de Almería. e-mail: mdurban@ual.es

⁽⁴⁾ Dpto. Física Aplicada. Universidad de Jaén. 23071 Jaén e-mail: dpozo@ujaen.es

1. RESUMEN

El conocimiento de la radiación solar es muy importante a la hora de diseñar sistemas solares tanto térmicos, como fotovoltaicos. En escalas locales, la topografía es el factor más importante modulador de la radiación solar en superficie. En este trabajo se estima la radiación global diaria en todo tipo de condiciones de cielo, en zonas que presentan una topografía compleja. Para ello se utilizará una metodología basada en Modelos Digitales del Terreno (MDT) a partir, por un lado, de medidas piranométricas y, por otro, de imágenes de satélite. Se pone de manifiesto que la aplicación del MDT sobre medidas piranométricas proporciona mejores resultados que las estimaciones a partir de imágenes de satélite, si bien la precisión obtenida (RMSE & MBE) es del mismo orden de magnitud en ambos casos.

2. INTRODUCCIÓN

Uno de los factores determinantes para el desarrollo económico industrial de un país es poder compatibilizar el abastecimiento energético con la necesidad de cumplir con unos requerimientos medioambientales cada vez más restringidos. En este sentido las energías renovables cuentan con una importante ventaja competitiva ya que, además de aprovechar recursos propios inagotables, presentan características destacadas como son la ausencia de emisiones de dióxido de carbono, la ausencia de contaminación atmosférica y la escasa repercusión sobre el paisaje y la lluvia ácida. Dentro de las energías renovables la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica juegan un papel fundamental. Dichas energías se basan en el aprovechamiento directo de la radiación solar.

Una adecuada comprensión y modelización de la radiación solar es fundamental en la evaluación de los recursos energéticos renovables, en las modelizaciones climáticas y en las hidrológicas. En particular, en lo que se refiere al aprovechamiento energético de la energía solar, la difusión a gran escala de dicho aprovechamiento depende en gran medida de una estimación precisa de los recursos solares disponibles, y no sólo en áreas donde existen estaciones radiométricas, normalmente en grandes ciudades. El uso combinado del recurso solar evaluado junto a otro tipo de información (necesidades energéticas, distancia red eléctrica, etc.) puede ser introducido en sistemas de información geográfica (SIG), que permiten una adecuada gestión y toma de decisiones para la utilización de los recursos energéticos disponibles.

El método habitual para estimar la radiación solar en superficie horizontal es mediante medidas en tierra proporcionadas por radiómetros en redes dispersas. La estimación de la radiación en puntos diferentes a las estaciones se realiza mediante interpolación/extrapolación de los valores obtenidos. Este método es válido en lugares donde la variabilidad de los valores de radiación no es muy grande, pero resulta inadecuado si entre los puntos de recepción de datos se encuentran zonas cuyo comportamiento desde el punto de vista radiativo es muy diferente como ocurre con aquellos lugares de una gran complejidad topográfica. En estos casos la estimación de la radiación solar debe resolverse mediante redes radiométricas muy densas, de alto coste y gran dificultad de mantenimiento.

En zonas sin especiales características de variabilidad topográfica se observa una disminución lineal o logarítmica de la correlación entre los valores de radiación y la distancia entre estaciones. Sin embargo, en zonas de gran variabilidad

topográfica, la autocorrelación espacial es difícil de observar y para la mayoría de los terrenos a partir de distancias entre 300 y 1000 m es ya muy pequeña o desaparece (Dubayah and Van Katwijk, 1992). Diferentes investigadores han puesto de manifiesto que la estimación de la radiación solar mediante técnicas de interpolación / extrapolación pueden presentar en estos lugares grandes errores.

Las principales causas de variabilidad espacial de la radiación solar son: la orientación relativa de la tierra con respecto al sol, las nubes, los diferentes procesos de atenuación que sufre la radiación al interaccionar con la atmósfera y la topografía. La primera causa tiene su origen en la influencia del gradiente latitudinal y las estaciones. La segunda está asociada con el clima local. La tercera causa está asociada a los efectos de la topografía, como son la altura sobre el nivel del mar que determina la masa atmosférica que debe atravesar el flujo radiante incidente, la pendiente y orientación de las laderas y los efectos de sombra que originan las colinas. Dichos efectos dan como resultado fuertes gradientes locales en la radiación solar.

En la bibliografía se encuentran diferentes modelos para estimar la radiación solar teniendo en cuenta los efectos de la topografía. Estos modelos utilizan aproximaciones teóricas en condiciones de cielo despejado, basados en datos meteorológicos. Para todo tipo de condiciones de cielo se estima la radiación solar a partir de las condiciones actuales de la atmósfera, entre las que cabe destacar la humedad relativa, la concentración de aerosoles, y el espesor óptico de las nubes. En los últimos años los grandes avances surgidos en los Sistemas de Información Geográfica (GIS) han hecho posible incluir los efectos de la topografía en los modelos de radiación solar, estimando la radiación solar con más precisión para un período determinado de tiempo. Algunos productos actualmente utilizados son Topo View (Dubayah and Rich, 1995) y Solar Analyst (Fu and Rich, 2000). Dichos modelos estiman la radiación global, directa y difusa así como el número teórico de horas de sol. Sus variables de entrada son los datos topográficos del terreno, introducidos a través de un Modelo Digital del Terreno y las condiciones atmosféricas.

Diferentes investigadores (Pérez et al., 1997, Zelenka et al., 1999) han puesto de manifiesto que la utilización de las imágenes de satélite en la estimación de la radiación solar mejora sustancialmente los resultados con respecto a las técnicas de interpolación/extrapolación. La evaluación de los recursos energético solares requieren observaciones continuas, debido a las variaciones que experimenta la intensidad del flujo radiante recibido en superficie, tanto por motivos estacionales como de variabilidad climática. Los

satélites geoestacionarios (METEOSAT) mantienen permanentemente su campo de visión sobre la misma zona de la tierra, con una frecuencia de varias imágenes por hora. Por este motivo son los más indicados para estimar la radiación solar incidente y evaluar su potencial energético.

La radiación solar a partir de imágenes de satélite ha sido estimada por Zelenka et al., 1999, utilizando relaciones empíricas para evaluar la nubosidad y calcular posteriormente la radiación solar. El Centre Energétique et Procédés (CEP), de la Escuela de Minas de París, en colaboración con otros Centros de Investigación europeos, desarrolló un modelo estadístico para estimar la radiación solar en la superficie terrestre a partir de imágenes de METEOSAT. Dicho modelo se conoce con el nombre de HELIOSAT (Cano, 1982; Cano et al., 1986; Diabaté et al., 1988). La idea básica del HELIOSAT es la correlación existente entre la cubierta nubosa y la radiación global incidente sobre un punto de la superficie terrestre. Este modelo fue uno de los primeros utilizados para el cálculo de la radiación global a partir de imágenes de satélite. Fue desarrollado utilizando medidas de estaciones francesas y tenía como objetivo la estimación de valores medios mensuales de radiación global (Diabaté, 1989). Posteriormente se han introducido diferentes modificaciones en este modelo (Beyer et al., 1996; Schukze-Kegel y Heidt, 1996; Dribssa et al., 1999) hasta llegar a una nueva versión denominada HELIOSAT-2

En el presente trabajo se estima la radiación global diaria en lugares que presentan una topografía compleja. En una primera etapa del trabajo se estima la radiación global diaria a partir de un modelo digital del terreno de (20x20) m y utilizando el programa informático Solar Analyst. Posteriormente estimamos la radiación global diaria a partir de imágenes de METEOSAT, para ello hemos utilizado una modificación del modelo HELIOSAT-2 (Zarzalejo, 2006). En la última etapa hemos comparado los resultados proporcionado por las dos técnicas con medidas experimentales.

3. DATOS EXPERIMENTALES

En este apartado se analizarán los datos experimentales utilizados en este trabajo. En primer lugar se presentan los datos de estaciones en tierra y posteriormente los de imágenes de satélite.

3.1 Medidas de Tierra

En el presente trabajo se han utilizado medidas de irradiancia global registradas en 14 estaciones situadas en la cara norte del Parque Natural de Sierra Nevada, en el término municipal de Hueneja (Granada). Las estaciones se encuentran situadas de

tal manera que cubren una gran diversidad topográfica. En la Tabla 1 se muestran las características de las mismas en términos de sus coordenadas, altitud, pendiente y orientación de las ladera de las colinas. La altitud de las estaciones oscila entre los 1091 y los 1654 m. Se incluye la ubicación de las estaciones respecto a los píxeles que las contienen.

Est	Pix	Alt.	Pen	Azi.	Glo (MJ/m ²)
1	1	1659	10	150	6693
2	1	1669	14	192	6557
3	1	1619	13	177	6645
4	1	1558	9	116	6696
5	1	1565	5	83	6517
6	1	1532	11	152	6713
7	1	1505	3	82	6583
8	1	1467	19	180	6737
9	1	1449	19	85	6437
10	2	1305	5	40	6819
11	2	1292	15	68	6658
12	2	1300	8	106	6828
13	3	1188	0	-	6754
14	4	1091	6	153	6696

Tabla 1. Características de las estaciones radiométricas.

Los valores de las pendientes se encuentran comprendidos entre los 0° y los 19°. La Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones en un mapa topográfico de la zona, se puede observar la complejidad topográfica del terreno.

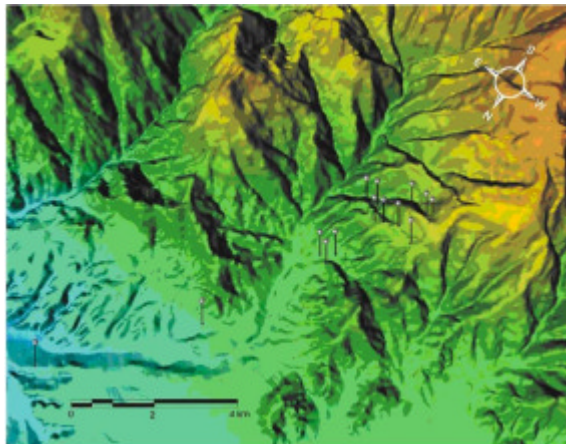


Figura 1. Ubicación de las estaciones en un mapa topográfico de la zona.

Para la realización de este trabajo se ha utilizado un año de medidas de radiación global. Dichas medidas se realizaron con un piranómetro LICOR 200-SZ, siendo el periodo de muestreo de 2.5 minutos. Como sistema de adquisición de datos se utilizó un HOBO. En todas las estaciones se midió la altitud, la orientación y la pendiente de las colinas, dichas medidas fueron comparadas con un Modelo Digital

del Terreno de (20x20)m, de la zona de estudio, proporcionado por la Agencia del Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

3.2 Imágenes de Satélite.

Las imágenes utilizadas en este trabajo cubren un periodo temporal coincidente con los datos piranométricos. Son imágenes de alta resolución espacial correspondientes al canal visible del satélite METEOSAT (HRI-VIS) y han sido registradas por la estación PDUS (Primary Data User Station) emplazada en el Departamento de Energías Renovables del CIEMAT (DER-CIEMAT). La Figura 2 muestra, a modo de ejemplo, una de estas imágenes.

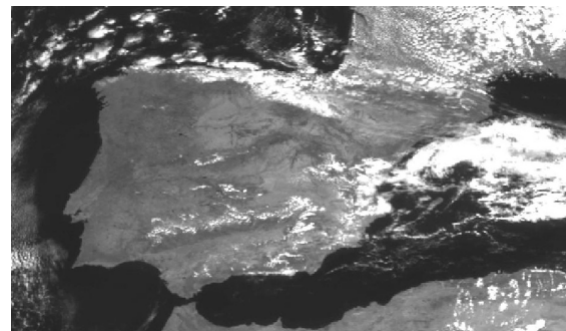


Figura 2. Ejemplo de imagen almacenada en la base de datos DER-CIEMAT (© 2003 EUMETSAT).

El satélite METEOSAT se encuentra situado en una órbita geoestacionaria a 0° de longitud. El elemento de detección principal del satélite es el sensor MVIRI (Meteosat Visible and Infrared Imager), un radiómetro de alta definición que constituye el principal subsistema del METEOSAT. Entre sus principales características (ver Tabla 2) destacar que registra información correspondiente a tres canales: visible, vapor de agua e infrarrojo.

Canal	VIS	WV	IR
Rango espectral (µm)	0.45 - 1.0	5.7 - 7.1	10.5 - 12.5
Detector	Fotodiodos de Si	HgCdTe	HgCdTe
Longitud focal	3650 mm	535 mm	

Tabla 2. Principales características del radiómetro MVIRI

La velocidad de rotación del satélite, el desplazamiento angular del telescopio y la altura orbital del satélite determinan la resolución temporal de las imágenes registradas, en este caso 30 minutos. El sensor MVIRI registra cada línea de muestreo de este a oeste aprovechando el sentido de rotación del satélite; el barrido sur-norte se efectúa gracias a la motorización del telescopio que permite un

desplazamiento angular de $1.25 \cdot 10^4$ radianes por rotación.

Las radiancias detectadas por el sensor son muestreadas 2500 veces por línea de barrido y, en función de la velocidad de rotación y el periodo de barrido, cada imagen está formada por 2500 líneas de forma que cada imagen consta de 2500×2500 elementos (puntos o píxeles de la imagen). Teniendo en cuenta que el satélite METEOSAT utiliza dos detectores simultáneos y complementarios para el canal visible y uno para cada uno de las otras dos bandas de recepción las imágenes correspondientes al canal visible están formadas por 5000×5000 píxeles (EUMETSAT, 2002).

En el caso de las imágenes correspondientes al canal visible el campo de visión instantáneo, en función de la amplitud angular del sensor y de la distancia orbital del satélite, es de 2.5 km en el *nadir* o punto del subsatélite (longitud 0° , latitud 0°), y el doble para los otros dos canales de detección. Debido a la curvatura terrestre esta magnitud se incrementa en función de la distancia al punto del subsatélite (para la Península Ibérica aproximadamente 3.5 km).

Para cada píxel de la imagen se dispone de un valor de brillantez (nivel digital) registrado por el satélite en una escala de grises 0-255 (8 bits).

4. METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología utilizada en este trabajo para estimar la radiación global diaria. En primer lugar se analizará los denominados Modelos Digitales del Terreno (MDT) y posteriormente la metodología de estimación de la irradiancia solar aplicada a las imágenes de satélite.

4.1 Modelos Digitales del Terreno

El efecto de la topografía en para un punto se computa, conocido el MDT, mediante tratamiento exclusivamente geométrico y con la precisión que desee (Dubayah and Rich, 1995, 1996; Rich et al., 1995). Los modelos basados en MDT posibilitan la obtención, para cada punto y para cada momento, de los horizontes artificiales y de la posición relativa del sol. De esta manera y, dependiendo de la complejidad del modelo, puede obtenerse para cada lugar la componente directa y difusa de la radiación solar y, como consecuencia, la radiación global. Para el cálculo de éstas componentes se han utilizado fundamentalmente los algoritmos de de Rich et al., 1995.

El programa Solar Analyst (Rich et al., 1995) ha sido empleado para simulación y predicción de de los valores de radiación en la zona inclinada. Dicho modelo estima la radiación global, directa y difusa

diaria a partir de un Modelo Digital del Terreno, la fracción difusa K (difusa/global) y la transmitancia atmosférica K_b (directa/global).

La radiación directa se obtiene como suma de los correspondientes sectores y se estima a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Dir_{tot} = ? Dir_{\gamma_a} \quad (1)$$

$$Dir_{\gamma_a} = I_{sc} * K_b * \exp(m(?)) * SunDur_{\gamma_a} * SunGap_{\gamma_a} * \cos(Angrn_{\gamma_a}) \quad (2)$$

$$Angrn_{\gamma_a} = \text{acos}(\cos(?) * \cos(G_z) + \text{sen} (?) * \text{sen}(G_z) * \cos(a - G_a)) \quad (3)$$

Donde:

? Ángulo cenital solar.

a Ángulo acimutal.

I_{sc} Constante solar.

K_b Transmitancia de la atmósfera.

$m(?)$ Masa óptica.

SunDur Horas de sol para un determinado sector.

SunGap Proporción de cielo visible del sector del mapa solar.

Angrn Ángulo de incidencia entre el centroide del sector del cielo y el eje normal a la superficie.

G_z Ángulo cenital de la superficie

G_a Ángulo acimutal de la superficie

De forma similar se obtiene la irradiancia difusa, por medio de las siguientes ecuaciones:

$$Dir_{tot} = ? Dir_{\gamma_a} \quad (4)$$

$$Dif_{\gamma_a} = R_{glo} * k * Dur * SkyGap_{\gamma_a} * Weight_{\gamma_a} * \cos(Angrn_{\gamma_a}) \quad (5)$$

Donde:

R_{glo} Radiación global. Se obtiene a partir de la radiación directa para cada sector y k . Incluyendo los sectores obstruidos.

k Fracción difusa.

Dur Duración del intervalo horario.

$SkyGap_{\gamma_a}$ Proporción de cielo visible del sector.

$Weight_{\gamma_a}$ Proporción de difusa de un sector con respecto a todos los sectores.

Por último la irradiancia global se calcula a partir de la irradiancia directa y difusa.

$$Global_{total} = Dir_{tot} + Dif_{tot} \quad (6)$$

4.2 El Modelo HELIOSAT-2

El modelo HELIOSAT-2 (Rigollier et al., 2004) surge como una evolución natural del denominado modelo HELIOSAT desarrollado por Cano y Diabaté durante los años 80 (Cano et al., 1986; Diabaté et al., 1988; Diabaté, 1989). Las mejoras introducidas en este modelo corresponden a modificaciones sobre el modelo de cielo claro utilizado (Beyer et al., 1996; Beyer et al., 1997; Rigollier and Wald, 1998; Dribssa et al., 1999) mediante la introducción de algún parámetro descriptivo de la calidad atmosférica. En ambos modelos se propone la estimación de un parámetro adimensional denominado *índice de cobertura nubosa* (n) a partir de las brillancias detectadas por el satélite.

El índice de cobertura nubosa se estima para cada píxel de la imagen en función de los denominados albedo instantáneo (r^t), albedo de las nubes (r_n^t) y albedo terrestre (r_g) según la siguiente expresión:

$$n^t = (r^t - r_g) (r_n^t - r_g)^{-1} \quad (7)$$

La evaluación de los diferentes albedos necesarios para el cálculo del índice de cobertura nubosa (Rigollier et al., 2004) se realiza a partir de la radiancia (L), los parámetros geográficos que definen el píxel en cuestión (latitud, longitud y altitud) y la información acerca de la calidad atmosférica local contenida en el coeficiente de turbidez atmosférica de Linke (T_L).

El cálculo de la radiancia recibida por el sensor del satélite se realiza según la siguiente expresión:

$$L^t = CC^t (ND^t - ND_0) \quad (8)$$

Donde:

ND^t	Nivel digital registrado por el sensor en un instante t .
ND_0	Offset del sensor.
CC^t	Función de calibración del sensor.

La función de calibración del sensor representa la variación de la respuesta del sensor en función de sus características físicas en el momento del lanzamiento del satélite y del tiempo de operación del mismo. Puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$CC^t = CC_0 + (D_s N^t 10^{-5}) \quad (9)$$

Donde:

CC_0	Coefficiente de calibración del sensor en el momento del lanzamiento (Wm^2sr^{-1}).
--------	---

D_s	Deriva diaria del sensor.
N^t	Número de días transcurridos desde el lanzamiento del satélite.

Estos parámetros son facilitados por EUMETSAT (EUMETSAT, 2005).

Para finalizar, el modelo HELIOSAT-2 calcula la irradiancia global horizontal mediante una relación entre el denominado índice de cielo claro K_C (global/global de cielo claro), y el índice de cobertura nubosa (n). La relación utilizada en este trabajo es una modificación sobre la propuesta original en la que se introduce la mediana local del índice de cobertura nubosa (\hat{n}) como variable explicativa (Zarzalejo, 2006):

$$K_C^{t*} = -0.764n^t + 0.216\hat{n} + 0.933 \quad (10)$$

imponiendo un truncamiento:

$$K_C^t = \max\{\min\{K_C^{t*}, 1.30\}, 0.05\} \quad (11)$$

De forma que la irradiancia global estimada en cada píxel puede calcularse según:

$$Global^t = K_C^t * G_{CS}^t \quad (12)$$

siendo G_{CS}^t la irradiancia global de cielo claro (ESRA, 2000).

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo se ha estimado la radiación global diaria en todo tipo de condiciones de cielo en 14 estaciones que presentan diferentes condiciones topográficas. En primer lugar se ha estimado la radiación global a partir de un modelo digital del terreno y utilizando el programa Solar Analyst (Fu and Rich, 1999, 2000). Posteriormente se estimó a partir de imágenes de METEOSAT y utilizando una modificación del modelo HELIOSAT-2 (Zarzalejo, 2006). En la última etapa hemos comparado los resultados proporcionado por las dos técnicas con medidas experimentales.

En la Tabla 1, podemos observar la variabilidad de la radiación global en el interior de un píxel. En el píxel 1, en el que se encuentran 9 estaciones, los valores de radiación oscilan entre 6437 MJ/m² de la estación 9 y los 6737 MJ/m² de la estación 8. El mínimo valor de radiación lo presenta la estación 9. Esto se debe fundamentalmente al efecto de la topografía.

En la Figura 3 se representa el horizonte de dicha estación. Podemos observar que hay una gran obstrucción de radiación solar en el Oeste de la estación, siendo mínima en el Este. Por el contrario la estación 14, que corresponde a la menor altitud, presenta un alto nivel de radiación, similar a la estación de mayor altitud. Esta estación se encuentra situada en una llanura; observamos en la Figura 4, que los efectos debidos al horizonte son mínimos.



Figura 3. Horizonte de la estación 9

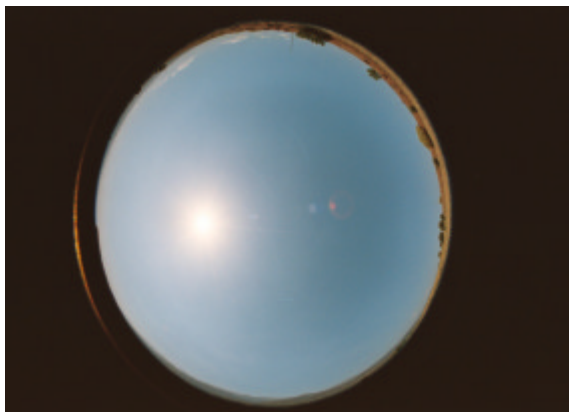


Figura 4. Horizonte de la estación 14.

Las principales variables de entrada del programa Solar Analyst son la fracción difusa, K (Global/Difusa), y la transmitancia atmosférica, K_b (Directa/Extraterrestre). K_b lo hemos estimado en función de las condiciones de cielo existentes. Para caracterizar el estado del cielo hemos utilizado el índice de claridad K_t . El índice de claridad nos informa de la cantidad de nubes presentes en la atmósfera, valores altos de K_t están asociados a cielos despejados y valores bajos de K_t a condiciones cubiertas de cielo. Hemos caracterizado el estado del cielo según cuatro intervalos de K_t , para cada uno de estos intervalos se calculó el valor medio mensual de K y K_b . La fracción difusa y la transmitancia atmosférica las estimamos utilizando medidas de irradiancia global, de una de las estaciones. Para ello utilizamos correlaciones del tipo, $K-K_t$ y K_b-K_t . La fracción difusa diaria la

estimamos utilizando la correlación de Collares-Pereira et al., 1979 y la transmitancia atmosférica a partir de la correlación de López et al., 2000. Dichas correlaciones son las que mejores resultados proporcionan para la zona de estudio. En la tabla 3., se muestran para cada uno de los meses del año los valores estimados de K y K_b , en función del índice de claridad K_t , dichos valores son los que se han utilizado en el presente trabajo.

	$K_t < 0.35$		$0.35 < K_t < 0.5$		$0.5 < K_t < 0.65$		$0.65 < K_t$	
	K	K_b	K	K_b	K	K_b	K	K_b
Jan	0.944	0.073	0.753	0.301	0.466	0.532	0.276	0.678
Feb	0.944	0.058	0.734	0.266	0.492	0.468	0.260	0.679
Mar	0.942	0.043	0.756	0.210	0.476	0.458	0.264	0.654
Apr	0.940	0.034	0.746	0.194	0.469	0.431	0.249	0.648
May	0.931	0.039	0.708	0.211	0.457	0.429	0.254	0.631
Jun	0.832	0.092	0.670	0.242	0.447	0.436	0.279	0.595
Jul	0.855	0.082	0.790	0.144	0.442	0.442	0.270	0.612
Aug	0.853	0.107	0.724	0.222	0.381	0.503	0.274	0.607
Sept	0.946	0.037	0.739	0.221	0.425	0.491	0.258	0.659
Oct	0.948	0.052	0.704	0.297	0.470	0.497	0.269	0.666
Nov	0.929	0.104	0.734	0.305	0.428	0.563	0.284	0.678
Dec	0.944	0.088	0.678	0.378	0.445	0.561	0.294	0.680

Tabla 3. Parejas de valores de K y K_b

En la Tabla 4 se muestran los resultados del análisis estadístico, en términos del error cuadrático medio (RMSE) y de la desviación media (MBE) entre los valores estimados a partir de imágenes de satélite (columna SATELITE), por el Solar Analyst a partir de datos piranométricos (columna TOPOVIEW), y por el Solar Analyst introduciendo el valor de K_t estimado a partir de imágenes de satélite (columna TOPOSAT).

Est	SATELITE		TOPOVIEW		TOPOSAT	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
1	16.91	0.78	11.17	0.21	19.30	4.07
2	17.90	4.33	11.39	2.04	20.51	9.99
3	17.75	2.20	12.76	2.16	19.90	5.10
4	15.46	-0.99	12.99	-0.49	16.62	-5.13
5	18.50	6.57	18.72	3.93	16.83	0.57
6	17.42	2.49	9.70	-0.45	18.97	3.40
7	18.79	32.49	14.38	0.29	17.23	-3.25
8	20.10	-0.47	11.09	-0.91	17.84	-1.84
9	21.27	10.71	13.39	3.04	20.06	-7.91
10	12.95	-0.48	13.17	-5.88	17.97	-4.61
11	14.17	5.26	8.71	-0.05	14.53	-5.02
12	13.57	-0.26	15.55	-10.66	17.20	-4.93
13	19.58	3.58	17.64	-3.75	20.20	-7.71
14	14.64	6.98	16.74	-2.54	17.08	1.33

Tabla 4. Resultados estadísticos (expresados en %)

Los resultados ponen de manifiesto que de tener un conocimiento preciso de las condiciones de cielo, y en aquellas estaciones que presentan una topografía compleja, el modelo basado en un Modelo Digital

del terreno proporciona mejores resultados que el que utiliza imágenes de satélite. Por el contrario en las estaciones que están situadas en un llano (12, 13 y 14) el modelo de imágenes de satélite proporciona mejores resultados. Globalmente podemos decir que la radiación global diaria la podemos estimar con un RMSE del orden de un 13% y una resolución de (20x20)m en el caso del modelo basado en un MDT y, de un RMSE del orden de un 17% y una resolución de (2.5x2.5)km en el caso del modelo de imágenes de satélite. Destacar que el modelo que utiliza un MDT y, un K_t , estimado a partir de imágenes de satélite (TOPOSAT) proporciona resultados similares al de imágenes de satélite, un RMSE, del orden del 18%, pero tiene mucha más resolución (20x20)m.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estimado la radiación global diaria en 14 estaciones que presentan una topografía compleja, utilizando el Programa Solar Analyst y un modelo basado en imágenes de METEOSAT. Se pone de manifiesto la variabilidad de la radiación global en el interior de un píxel de (2.5x2.5)km, siendo esta del orden del 5% en el píxel 1, y de un 3% en el píxel 2. Destacar que en el balance de radiación, el efecto de la topografía es fundamental, la estación que menos radiación recibe, es la que mayor horizonte presenta.

A la vista de los resultados obtenidos podemos decir que de disponer de medidas de irradiancia global en una de las estaciones podemos digitalizar la zona con una resolución de (20x20)m y un RMSE del orden del 13%. El modelo de imágenes de satélite estima la radiación global con RMSE del orden del 17%. Destacar que este modelo proporciona sus mejores resultados en aquellas estaciones en los que los efectos de la topografía son mínimos. Por último poner de manifiesto que si queremos realizar un mapa topográfico de radiación global de alta resolución espacial y, no disponemos de medidas de radiación global, podemos utilizar un modelo que tenga en cuenta un Modelo Digital del Terreno y, en el que introducimos el índice de claridad K_t , estimado a partir de imágenes de satélite. Con este método se estima la radiación global diaria con un RMSE del orden del 18% y la resolución que presente el MDT.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al proyecto ENE2004-07816-C03-01 financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

7. REFERENCIAS

Beyer, H. G., Costanzo, C. and Heinemann, D., 1996. Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy* 56, 207-212.

Beyer, H. G., Hammer, A. and Heinemann, D., 1997. Satellite-derived irradiance statistics for Africa. *Solar Energy* 59, 233-240.

Cano, D., 1982. Etude de l'enneuagement par analyse de séquences d'images de satellite. Application à l'évaluation du rayonnement solaire global au sol. Thèse 3ème Cycle, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris (France).

Cano, D., Monget, J. M., Albuisson, M., Guillard, H., et al. 1986. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy* 37, 31-39.

Collares-Pereira, M. y Rabl, A., 1979. The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* 22, 155-164.

Diabaté, L., Demarcq, H., Michaud-Regas, N. and Wald, L., 1988. Estimating incident solar radiation at the surface from images of the Earth transmitted by geostationary satellites: the Heliosat Project. *International Journal of Solar Energy* 5, 261-278

Diabaté, L., 1989. Determinacion du rayonnement solaire a l'aide d'images satellitaires. Tesis Doctoral. L'École Nationales Superieure des Mines de Paris

Dribssa, E., Cogliani, E., Lavagno, E. and Petrarca, S., 1999. A modification of the Heliosat method to improve its performance. *Solar Energy* 65, 369-377.

Dubayah and Van Katwijk, 1992. The topographic distribution of annual incoming solar radiation in the rio grand River basin. *Geophys Res. Lett.* 19, 2231-2234.

Dubayah and Rich, 1995. Topographic solar models for GIS. *Int J. Geographical Information System*, 4, 405-419.

ESRA, 2000. The European solar radiation atlas. Vol. 1: Fundamentals and maps. Editado por: Scharmer, K. and Reif, J. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris (France).

EUMETSAT, 2002. Meteosat High resolution image dissemination. Technical description. EUMETSAT, Darmstadt (Germany).

EUMETSAT. Meteosat VIS channel calibration information (v 23.11.05). www page EUMETSAT. <http://www.eumetsat.de>.

Fu, P and Rich, P., 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an Arcview extension for modelling solar radiation at landscape scales. Proceedings of 19th Annual ESRI User Conference, San Diego, USA.

Fu and Rich, 2000. Geometric solar radiation models and its applications in the agricultura and forestry. Proceedings of Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena vista.

Lopez, G., Rubio, M. A. y Batlles, F. J., 2000. Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain. Renewable Energy 21, 175-186.

Perez, R., Seals, R. and Zelenka, A., 1997. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. Solar Energy 60, 89-96.

Rigollier, C., Lefèvre, M. and Wald, L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. Solar Energy 77, 159-169.

Rigollier, C. and Wald, L., 1998. Using METEOSAT images to map the solar radiation: improvement of the Heliosat method. Ponencias de: 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris (France). pp. 432-433.

Schulze-Kegel, D. and Heidt, F. D., 1996. Mapping of global radiation with METEOSAT. Solar Energy 58, 77-90.

Zarzalejo, L. F., 2006. Irradiancia solar global horaria a partir de imágenes de satélite. Serie: Colección Documentos CIEMAT. Editorial CIEMAT, Madrid (España).

Zelenka, A., Pérez, R., Seals, R., Renné, D., 1999. Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. Theoretical and Applied Climatology, 62, 199-207.