

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA ATÓMICA, MOLECULAR Y
NUCLEAR**



TESIS DOCTORAL

**OPTIMIZACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN
DE LA
RADIACIÓN SOLAR A PARTIR DE IMÁGENES DE
SATÉLITE**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

JESÚS POLO MARTÍNEZ

Bajo la dirección del doctor:

Luis F. Zarzalejo Tirado

Madrid, 2010

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
DEPARTAMENTO DE FÍSICA ATÓMICA, MOLECULAR Y NUCLEAR



**OPTIMIZACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA
RADIACIÓN SOLAR A PARTIR DE IMÁGENES DE
SATÉLITE**

Memoria para optar al grado de Doctor
presentada por

JESÚS POLO MARTÍNEZ

Dirigida por:

Dr. LUIS F. ZARZALEJO TIRADO

Madrid, ABRIL de 2009

AGRADECIMIENTOS

Es realmente difícil escribir esta sección sin omitir ningún nombre que merezca aparecer aquí, por lo que sirva este primer párrafo como mención a todas aquellas personas, amigos y familiares que han estado y están cerca de mí apoyándome tanto en los aspectos de mi vida personal como profesional.

A los grandes y buenos compañeros que tengo en CIEMAT con los que he compartido tantas cosas en los últimos 17 años y de los que he recibido una valiosísima ayuda en muchos aspectos de mi carrera profesional.

Debo señalar especialmente a Lourdes, que me inició en este campo del conocimiento y a Luis con quien me he ido complementado de una forma admirable en este campo profesional y a quien definitivamente debo la existencia de esta memoria.

Finalmente quiero dedicar esta memoria a Virginia, a mis hijos y a mi familia.

LISTA DE PUBLICACIONES ORIGINALES

Esta tesis doctoral se presenta en *formato publicaciones*, de acuerdo con el apartado 4.4 de la Normativa de desarrollo de los artículos 11, 12, 13 y 14 del real decreto 56/2005, de 21 de enero, por el que se regulan los estudios oficiales de postgrado de la Universidad Complutense (aprobado en consejo de gobierno con fecha 13 de junio de 2005, BOUC 5 de julio de 2005). Dichas publicaciones recogen todos los resultados que han sido obtenidos en los diferentes trabajos de investigación desarrollados con el fin de alcanzar el objetivo fijado para la realización de la tesis. A continuación se listan las referidas publicaciones que constituyen los Anexos de la presente memoria de tesis.

Anexo I

Polo J., Zarzalejo L.F., Ramírez L., (2008). Solar Radiation Derived from satellite Images, pp. 449-460. Chapter 18 from : Modeling Solar Radiation at the Earth Surface. Edited by Viorel Badescu. Springer-Verlag.

<http://www.springer.com/engineering/energy+technology/book/978-3-540-77454-9>

Anexo II

Zarzalejo, L. F., Ramírez, L. y Polo, J., 2005. Artificial intelligence techniques applied to hourly global irradiance estimation from satellite-derived cloud index. Energy 30, 1685-1697.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/03605442>

Anexo III

Polo, J., Zarzalejo, L. F., Ramirez, L. y Espinar, B., 2006. Iterative filtering of ground data for qualifying statistical models for solar irradiance estimation from satellite data. Solar Energy 80, 240-247.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/0038092X>

Anexo IV

Zarzalejo, L. F., Polo, J., Martin, L., Ramirez, L. y otros, 2009. A new statistical approach for deriving global solar radiation from satellite images. Solar Energy 83, 480-484.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/0038092X>

Anexo V

Polo, J., Zarzalejo, L. F., Salvador, P. y Ramírez, L., 2009. Angstrom turbidity and ozone column estimations from spectral solar irradiance in a semi-desertic environment in Spain. Solar Energy 83, 257-263.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/0038092X>

Anexo VI

Polo, J., Zarzalejo, L. F., Martin, L., Navarro, A. A. and Marchante, R., 2009. Estimation of daily Linke turbidity factor by using global irradiance measurements at solar noon. Solar Energy. 83, 1177-1185.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/0038092X>

Anexo VII

Espinar, B., Ramírez, L., Drews, A., Beyer, H. G., Zarzalejo, L. F., Polo, J. and Martín, L., 2009. Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and German radiometric stations. Solar Energy. 83, 118-125.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/0038092X>

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
2	PRESENTACION Y DISCUSION DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS.....	3
2.1	Fundamentos de los modelos de satélite para estimar la radiación solar	5
2.2	Datos experimentales	7
2.3	Modelos estadísticos y selección de datos de entrenamiento	8
2.4	Cálculo del índice de nubosidad. Aproximación heliosat-2	10
2.5	Modelo de cielo despejado del ESRA	12
2.6	Estimación de la irradiancia global horizontal	14
2.7	Metodología de selección de días despejados	16
2.8	Estimación de la irradiancia directa	17
2.9	Estimación local del factor de turbidez de Linke	18
2.10	Evaluación de la metodología en condiciones de cielo despejado	23
3	CONCLUSIONES.....	27
4	REFERENCIAS	31

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La radiación electromagnética emitida por el Sol constituye el origen primigenio de todas las fuentes de energía en la Tierra. La radiación solar que incide en el sistema Tierra-Atmósfera juega, así, un papel esencial en los distintos procesos físico-químicos que condicionan los fenómenos meteorológicos, climáticos y biológicos en nuestro planeta. Es importante para diversas ramas de la ciencia, por tanto, entender la física de la radiación solar, y en particular determinar y cuantificar la radiación solar incidente en la superficie terrestre. Así, desde un punto de vista energético cualquier sistema de aprovechamiento de la energía solar requiere, en primera instancia, determinar con precisión la cantidad de energía radiante que se recibe en un punto concreto.

El objetivo principal de esta tesis es la optimización de varios modelos hacia una metodología completa y operativa para la estimación de series horarias de irradiancia solar global horizontal y directa en la geografía española, empleando como fuente de información las imágenes de alta resolución del canal visible del radiómetro MVIRI (Meteosat Visible and Infrared Imager) instalado en las plataformas de la primera generación del satélite Meteosat (EUMETSAT, 2002). Para ello, esta tesis toma como punto de partida el modelo regional que relaciona el índice de cielo despejado con el coeficiente de nubosidad propuesto por Zarzalejo (Zarzalejo, 2005; Zarzalejo et al., 2006a; Zarzalejo et al., 2006b), y a partir de éste se propone un modelo y una metodología para mejorar la estimación de la radiación global en condiciones de cielo despejado y para estimar la irradiancia directa en todo tipo de cielo.

En este objetivo general, arriba mencionado, se pueden distinguir los objetivos parciales que a continuación se detallan, y que se pueden considerar como las principales contribuciones de esta tesis doctoral:

La separación del conjunto de datos experimentales disponibles en dos espacios muestrales (tal y como se suele hacer en las técnicas de inteligencia artificial), uno para el desarrollo de modelos (datos de entrenamiento) y el otro para la validación. En este sentido se propone un método iterativo para la selección de los datos de entrenamiento más propicios para el desarrollo de modelos estadísticos de ajuste.

El desarrollo de un modelo de detección y selección de días de cielo despejado que se puede aplicar tanto a bases de datos de radiación global medidas en tierra como a estimaciones provenientes de imágenes de satélite.

La selección de un modelo de descomposición adecuado para la obtención de la irradiancia directa a partir de la irradiancia global horizontal, que se aplique en todo tipo de condiciones de cielo.

El uso de datos medidos de las componentes global y directa de la radiación solar de elevada calidad y precisión para el análisis de parámetros asociados a la turbidez atmosférica, desarrollo de modelos y su posterior evaluación, aplicando parámetros diversos para evaluar la incertidumbre en los datos y estimaciones de la radiación solar.

El análisis de las técnicas y fotométricas para estimar y estudiar la dinámica de la turbidez atmosférica en España como principal fuente de atenuación de la radiación solar directa.

El desarrollo de un modelo para la estimación del factor de turbidez de Linke diario en días despejados, a partir de las medias mensuales que están disponibles en bases de datos abiertas y su aplicación para la estimación de la irradiancia global horizontal y directa en condiciones de cielo despejado.

En esta memoria se presenta, por tanto, una metodología operativa para la estimación de la irradiancia solar global horizontal y directa en la geografía española a partir de imágenes de alta resolución del canal visible de la familia de satélites METEOSAT primera generación. La metodología aquí presentada permite la generación de series temporales de irradiancia solar horaria durante un periodo de 12 años, desde 1994 a 2005.

Esta memoria se estructura como una colección de publicaciones, 1 capítulo de libro y 6 artículos publicados en revistas incluidas en la base de datos SCI (Science Citation Index), donde se presentan de forma detallada los fundamentos teóricos, los distintos resultados obtenidos y las contribuciones a esta tesis. Estas publicaciones figuran en los anexos I a VII de esta memoria.

De las publicaciones presentadas en los anexos de esta memoria cabe destacar, en relación con las contribuciones personales de mayor peso en esta memoria de tesis, aquellas que figuran en los anexos I, III, V y VI. Estas desarrollan respectivamente: la revisión del estado de conocimiento sobre radiación solar a partir de imágenes de satélite, el método de filtrado iterativo de datos de entrenamiento para el desarrollo de modelos, el análisis de la turbidez atmosférica a partir de espectrorradiometría solar, el algoritmo de selección de días de cielo despejado y el método para la determinación y corrección del factor turbidez de Linke a partir de la irradiancia global horizontal.

Además de los anexos, la memoria incluye una discusión integradora que unifica y describe los principales resultados de las publicaciones añadidas. Finalmente, se incluye un capítulo con las conclusiones, principales aportaciones y líneas de trabajo futuro.

2. PRESENTACION Y DISCUSION DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS

Las dos características fundamentales de la radiación solar como fuente energética son su baja densidad y su elevada variabilidad temporal, ambas fundamentales cuando se intenta aprovechar la energía procedente del Sol. La radiación solar en la superficie de la Tierra está regulada tanto por las condiciones geométricas del movimiento de la Tierra alrededor del Sol y entorno a su propio eje de rotación, como por la naturaleza y distribución, un tanto aleatoria, de los constituyentes de la atmósfera terrestre.

La radiación solar en la parte externa de la atmósfera terrestre es una cantidad bastante constante en el tiempo. Su variabilidad se debe en primer lugar a los ligeros cambios en la distancia Sol-Tierra y en menor proporción a los ciclos de actividad solar, cuyo periodo se sitúa en aproximadamente 11 años. Su cuantificación se basa en asumir que la densidad de flujo de energía radiante, o irradiancia, a la distancia media entre el Sol y la Tierra es una constante, cuyo valor más aceptado como consecuencia de la medida por satélite, es 1367 Wm^{-2} (Fröhlich y Brusa, 1981; WMO, 1981; Fröhlich, 2002); este valor (denominado Constante Solar) se corrige con un parámetro que es el cociente entre las superficies de dos esferas, una de radio la distancia Sol-Tierra y la otra de radio el promedio de dicha distancia. Las características geométricas del sistema Sol-Tierra determinan además el ángulo de incidencia de la irradiancia solar sobre cada punto de la superficie terrestre, estableciendo con ello los ciclos diarios, las estaciones y el efecto de la latitud.

La atmósfera terrestre con sus distintos constituyentes supone un filtro complejo para la radiación solar que atenúa en mayor o menor medida, dependiendo de su estado, la irradiancia solar que llega finalmente a la superficie de la Tierra. La interacción de los fotones con los componentes atmosféricos se realiza por los mecanismos de absorción y dispersión, cuya acción conjunta se denomina atenuación de la radiación solar por la atmósfera (Iqbal, 1983; Liou, 2002).

La absorción de radiación solar por la atmósfera terrestre por algunos de los elementos atómicos y moléculas gaseosas que se distribuyen en la misma, como el O, N, O₂, O₃, N₂, H₂O y CO₂ entre otros, es espectralmente selectiva, capturando fotones en diversos rangos de longitudes de onda y transformando, como consecuencia de la absorción, parte de la energía radiante en energía térmica. Así, la acción conjunta del Nitrógeno y Oxígeno atómicos de las partes más altas de la atmósfera, y del Nitrógeno y Oxígeno moleculares, produce que no llegue a la superficie terrestre radiación por debajo de los 200 nm, posibilitando así la existencia de seres vivos en nuestro planeta. Por otro lado, en el rango del espectro solar con intensidad apreciable cabe señalar las bandas de absorción del ozono (la de Hartley y Huggins en el ultravioleta, y con mucho menor efecto la de Chappuis en el visible), así como las distintas bandas de absorción del vapor de agua en el infrarrojo cercano.

La dispersión de fotones en la atmósfera terrestre depende del tamaño del blanco de dispersión y se divide en dispersión Rayleigh y dispersión Mie. La dispersión Rayleigh ocurre cuando el tamaño del blanco es muy inferior a la longitud de onda de la radiación

incidente, como ocurre con las moléculas de aire. Esta es muy dependiente de la longitud de onda, siendo proporcional a λ^{-4} , lo que explica el color azul del cielo. Además, este tipo de dispersión es máxima en la dirección de propagación de la radiación incidente y mínima en la dirección perpendicular. La dispersión Mie acontece cuando el tamaño del blanco es del orden o superior a la longitud de onda de la radiación incidente, como es el caso de los aerosoles suspendidos en la atmósfera, de las partículas de hielo y de las gotas de agua que forman las nubes. Su intensidad es máxima en la dirección y sentido de propagación de la radiación incidente. En el caso de los aerosoles atmosféricos la dispersión Mie depende ligeramente de la longitud de onda en función del tamaño del aerosol. En el caso de las nubes, el tamaño de partícula es tan grande que la dispersión no depende de la longitud de onda de los fotones incidentes, denominándose dispersión Mie no selectiva. La dispersión Mie no selectiva explica, por tanto, el color blanco de las nubes.

Como consecuencia de la interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre, una fracción de la radiación que incide sobre la atmósfera es retro-dispersada de nuevo al medio interplanetario. Otra parte es absorbida por la propia atmósfera y el resto se transmite hacia la superficie terrestre. De esta última fracción la parte que alcanza la superficie terrestre sin modificar su dirección original, es decir la parte que no se dispersa, se denomina radiación directa. Por otro lado, la parte que llega a la superficie de la Tierra como consecuencia de la dispersión en la atmósfera se conoce como radiación difusa, procedente de todos los puntos de la bóveda celeste sin tener una dirección de propagación predominante. La contribución conjunta de estas dos componentes, directa y difusa, más la reflejada (si las condiciones del terreno y la superficie captadora lo permiten) produce lo que se conoce como radiación global (Muneer et al., 2004).

La medida experimental de las distintas componentes de la radiación solar está en constante evolución. Muchos países han desarrollado y mantenido redes radiométricas con diversos propósitos y, en consecuencia, distinto grado de calidad en las medidas. De manera genérica se acepta la división entre fuentes primarias, que consisten en datos puramente medidos, y fuentes secundarias de datos de radiación solar, que emplean datos parcial o completamente obtenidos por modelos (Gueymard C.A. y Myers D.R., 2008). En relación con las fuentes primarias existen grandes redes radiométricas. En este sentido destacan el World Radiation Data Center (WRDC) que es un repositorio de los datos registrados por los distintos países miembros de la WMO, que contiene principalmente datos de radiación solar global y de horas de insolación. La Baseline Surface Radiation Network (BSRN), también patrocinada por la WMO, se ha convertido en el estándar de referencia en cuanto al proceso de control de calidad de los datos registrados (McArthur, 1998) que además incluye en todas sus estaciones medidas de las componentes global, difusa y directa de la radiación solar. En Estados Unidos hay que mencionar la Surface Radiation (SURFRAD) de la Nacional Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el programa ARM (Atmospheric Radiation Measurement) del cual muchas de sus estaciones pertenecen a su vez a la BSRN. En Brasil destaca su amplia red radiométrica por su implicación en el proyecto SWERA (Martins et al., 2007). Finalmente, España dispone de la red radiométrica nacional que gestiona la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) que viene registrando datos desde la década de los 70. La red nacional ha ido evolucionando hacia una mayor calidad en la medida, aproximándose a los estándares de la BSRN, y sus registros se envían periódicamente al WRDC.

Sin embargo, a pesar del crecimiento en precisión y disponibilidad de las bases de datos de medidas de la radiación solar, su densidad espacial es aún insuficiente para poder explicar las variaciones geográficas características de la radiación solar. Es por ello que, durante los últimos 30 años se han venido desarrollando diversos modelos enfocados hacia la estimación de la irradiancia solar global a partir de imágenes de satélite. Los satélites geoestacionarios como METEOSAT o GOES ofrecen la oportunidad de extraer información sobre la radiación solar para grandes áreas geográficas, con resolución temporal de hasta 15 minutos y resolución espacial de hasta 1 km (Hammer et al., 2003; Polo et al., 2008). La metodología de estimación de la radiación solar a partir de satélites geoestacionarios ha demostrado mayor precisión en la estimación de valor horarios de irradiancia solar que la interpolación espacial a partir de datos de estaciones de medida que disten entre si 25 km (Zelenka et al., 1999). Los satélites geoestacionarios detectan en el canal visible información sobre la cubierta de nubes y, en consecuencia, sobre la radiancia retro-dispersada por las nubes y la atmósfera terrestre. Esta es pues la base para cuantificar la radiación solar transmitida por la atmósfera. Sin embargo, además de esta información es conveniente disponer de información precisa sobre los parámetros atmosféricos involucrados en la dispersión y absorción de la radiación solar (Mueller et al., 2004b). El conocimiento de estos parámetros atmosféricos permite la estimación de la radiación solar en condiciones de cielo despejado y se usa además como función de normalización en los modelos de satélite (Mueller et al., 2004a; Ineichen, 2008a).

2.1 Fundamentos de los modelos de satélite para estimar la radiación solar

La estimación de la radiación solar en la superficie terrestre a partir de imágenes de satélites geoestacionarios comienza a finales de la década de los 70, cuando se presentan los primeros modelos empleando imágenes del satélite GOES (Tarpley, 1979; Gautier et al., 1980). Desde sus comienzos los modelos propuestos se han podido clasificar en dos categorías: modelos físicos y modelos puramente estadísticos (Noia et al., 1993a; Noia et al., 1993b). Los primeros se basan en la aplicación de leyes físicas sobre estructuras atmosféricas definidas por un conjunto de parámetros provenientes de la climatología, y necesitan, por tanto, de información precisa sobre los componentes de la atmósfera (Pinker y Laszlo, 1991; Pinker et al., 1995). Los modelos estadísticos son más sencillos, empleando relaciones empíricas obtenidas con medidas en tierra para cuantificar la transmitancia de la atmósfera terrestre. Sin embargo, la tendencia actual apunta hacia la unificación a través de modelos híbridos, en los que la formulación inicialmente de tipo estadístico se complementa con parámetros físicos relacionados con el espesor óptico o con relaciones paramétricas basadas en modelos de transferencia radiativa para conocer la atenuación de la radiación solar en condiciones de cielo despejado (Pereira et al., 2000; Perez et al., 2004; Schillings et al., 2004; Mueller et al., 2004c). La revisión sobre el estado actual, fundamentos, así como la descripción de algunos de los modelos de mayor difusión se encuentra resumida en el Anexo I (Polo et al., 2008).

Desde un punto de vista cuantitativo una imagen de satélite es una medida de la radiancia del sistema tierra atmósfera integrada en un rango concreto de longitudes de onda para un instante temporal dado y una ventana espacial concreta (Figura 1). La radiancia se define como el flujo radiante por unidad de ángulo sólido que emerge de una superficie en una dirección dada. Los valores de la radiancia medidos por el

radiómetro a bordo del satélite varían de acuerdo con el estado de la atmósfera, desde un estado de cielo despejado hasta el estado de cielo completamente cubierto, y dependen además de la reflectancia de la superficie terrestre. En este sentido, las imágenes de satélite en el canal visible ofrecen información sobre la nubosidad en un lugar e instante temporal concreto. Por lo tanto, de la información que recibe el sensor del satélite se puede definir un parámetro normalizado que describa la nubosidad. Este parámetro se conoce como índice de nubosidad, definido matemáticamente como (Cano et al., 1986; Diabaté et al., 1989),

$$n = \frac{\rho - \rho_g}{\rho_c - \rho_g} \quad (1)$$

donde ρ es la reflectancia observada por el sensor del satélite (conocida como albedo planetario instantáneo), ρ_c es la reflectancia o albedo de las nubes y ρ_g es el albedo terrestre. La reflectancia se puede obtener a partir de la radiancia, que es la magnitud que se mide por el sensor, asumiendo isotropía,

$$\rho = \frac{\pi L_\Delta}{E_\Delta} \quad (2)$$

donde L_Δ es la radiancia y E_Δ se refiere a la irradiancia solar (en la banda espectral del canal del satélite) incidente en la parte exterior de la atmósfera, es decir, el término fuente en el rango espectral de sensibilidad del sensor.



Figura 1. Componentes de la radiancia que detecta el sensor en el canal visible de un satélite geoestacionario

De la expresión del índice de nubosidad se desprende que bajo situaciones de cielo completamente despejado el albedo planetario instantáneo tiende a aproximarse al albedo terrestre, con lo que el índice de nubosidad tiene a cero; del mismo modo, en condiciones de cielos muy cubiertos el albedo planetario instantáneo tiende al valor del albedo de las nubes, con lo que el índice de nubosidad se aproxima a la unidad.

La importancia del concepto de índice de nubosidad se basa en que la información de satélite puede relacionarse con la irradiancia solar que alcanza la superficie de la Tierra. En consecuencia, la mayoría de las metodologías de estimación de la radiación solar con imágenes de satélite asumen una relación lineal entre la transmitancia atmosférica y el índice de nubosidad (Cano et al., 1986; Diabaté et al., 1988; Diabaté et al., 1989; Noia et al., 1993a; Ineichen y Perez, 1999; Zelenka et al., 1999).

2.2 Datos experimentales

En el trabajo que describe esta memoria se han empleado tres tipos de datos experimentales:

Imágenes de alta resolución del canal visible del satélite Meteosat 1ª generación.

Datos horarios de las tres componentes de la radiación solar (global horizontal, difusa y directa) medidos en estaciones meteorológicas de calidad.

Datos de las medias mensuales del factor de turbidez de Linke de la base de datos SODA (<http://www.soda-is.com/eng/index.html>).

En relación con los datos radiométricos cabe distinguir entre tres fuentes de datos experimentales: los datos de irradiancia solar horaria integrada de varias estaciones de la red radiométrica nacional de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet), los datos de irradiancia solar horaria integrada de algunas estaciones de la BSRN y los datos de la irradiancia directa espectral de un espectrorradiómetro ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA).

Las imágenes de satélite utilizadas en este trabajo son imágenes de alta resolución del canal visible del MVIRI. La banda espectral de sensibilidad del canal visible del instrumento MVIRI está comprendida en el intervalo 0.45-1.0 μm . Este instrumento barre el disco completo de la Tierra durante un periodo de 30 minutos, por lo que Meteosat disemina 48 imágenes (slots) por día. El conjunto completo de imágenes disponible abarca 5 imágenes por día, que corresponden a los slots 21, 23, 25, 27 y 29, durante el periodo de 1994-2005. Todo el conjunto de imágenes ha sido preconditionado para permitir la superposición y la correcta georreferenciación de todas ellas (Zarzalejo, 2005). En la Figura 2 se ilustra una de las imágenes usadas en este trabajo.

Los datos radiométricos de banda ancha empleados consisten en los siguientes grupos:

Valores horarios de irradiancia global horizontal de 28 estaciones de la AEMet durante el periodo de Enero de 1994 a Diciembre de 2004 para el desarrollo del modelo de estimación de la irradiancia global a partir de imágenes de satélite.

Datos de las tres componentes de la irradiancia solar horaria (global horizontal, directa y difusa) de 6 estaciones de la AEMet en el periodo de Enero de 2000 a Diciembre de 2004 para el desarrollo del modelo de estimación de la turbidez de Linke, validación del mismo y de la estimación de la irradiancia directa horaria.

Datos de las tres componentes de la irradiancia solar horaria en tres estaciones de la BSRN para el desarrollo del modelo de estimación de la turbidez de Linke.

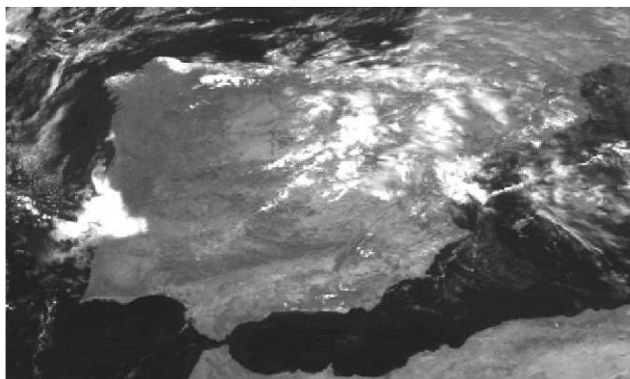


Figura 2. Imagen del canal visible de Meteosat de alta resolución procesada y preconditionada (EUMETSAT, 2000).

Todos los datos radiométricos empleados han sido filtrados previamente mediante los procedimientos de control de calidad recomendados por la BSRN (McArthur, 1998; Geiger et al., 2002; Zarzalejo, 2005). Los datos radiométricos de la AEMet se han empleado al amparo del proyecto SOLSAT - Referencia REN2001-0686, Plan Nacional CICYT- (Zarzalejo, 2005). Los datos horarios de las estaciones BSRN se han empleado al amparo del proyecto MESoR – Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge -VI Programa Marco de la Union Europea, Contrato N° 038655- (Hoyer-Klick et al., 2008). Los datos de irradiancia directa espectral empleados en el análisis de la turbidez atmosférica están asociados al proyecto del Plan nacional CICYT denominado MEDERAS -Referencia ENE2005-08-27- (Polo et al., 2009b).

2.3 Modelos estadísticos y selección de datos de entrenamiento

La gran ventaja de los modelos estadísticos es su sencillez y su facilidad de implementación y operación. Sin embargo, requieren de una buena base de datos experimentales y suelen tener un carácter local. Dentro de los modelos estadísticos se pueden incluir aquellos basados en técnicas de inteligencia artificial, como la lógica difusa o las redes neuronales. Los modelos para estimar la radiación solar a partir de imágenes de satélite de tipo estadístico se basan en ajustar una expresión matemática que relacione el índice de nubosidad con algún parámetro normalizado de la irradiancia solar, como pudiera ser el índice de transparencia atmosférica ó el índice de cielo

despejado. La relación funcional entre índice de nubosidad y radiación solar se puede encontrar usando regresiones simples o multivariantes, modelos de lógica difusa o redes neuronales. Además, se pueden introducir variables adicionales de tipo binario en el modelo, también conocidas como variables cualitativas o categóricas, que permiten que el modelo pueda responder ante efectos de segundo orden, comparados con la nubosidad, como pudieran ser la estación del año o la elevación solar. En el Anexo II (Zarzalejo et al., 2005) se presenta una comparación entre diversas técnicas de tipo estadístico para estimar la radiación solar global horizontal a partir del índice de nubosidad.

Las incertidumbres de los modelos estadísticos para estimar la radiación solar provienen tanto de la incertidumbre en los datos de satélite como la de los datos medidos en tierra. Una forma de mejorar los resultados de un modelo particular podría estar en la selección adecuada de los datos de entrenamiento para ajustar el modelo. Esta aproximación, inspirada en los algoritmos de aprendizaje de las redes neuronales, consiste cualificar de forma estadística los conjuntos de datos de entrenamiento para mejorar la precisión de un modelo particular. En el Anexo III (Polo et al., 2006) se propone y se detalla un método iterativo para la selección de datos de entrenamiento y se presentan los resultados para el caso concreto de estimación de la irradiancia global horizontal horaria a partir de imágenes de satélite.

De forma general, un modelo estadístico que relaciona el índice de transparencia atmosférica con el índice de nubosidad se puede representar como,

$$K_T = \frac{G}{\varepsilon I_{SC} \sin \alpha} = f(n) + e \quad (3)$$

donde f es una función del índice de nubosidad y e es el término de error, también conocido como los residuos del modelo (Petrucci et al., 1999). La relación funcional determinada por f puede ser, por ejemplo, una función lineal o multilineal. Los residuos del modelo, por definición, siguen una distribución normal de media cero.

El método de filtrado iterativo consiste en eliminar de la muestra de datos de entrenamiento aquellos que produzcan un *outlier* en la distribución de los residuos. Un *outlier* se define como un dato extremadamente no representativo que se sitúa lejos de la distribución esperada de un conjunto de datos (Petrucci et al., 1999). Los *outlier* parecen, por tanto, explicar un patrón que es inconsistente con el grueso de la evidencia de datos. Para encontrar los *outlier* de un conjunto de datos, se deben determinar los límites superior e inferior del recorrido intercuartílico,

$$A_- = Q_1 - 1.5 IQR \quad A_+ = Q_3 + 1.5 IQR \quad (4)$$

donde Q_1 es el primer cuartil de la distribución de residuos, Q_3 es el tercer cuartil, e IQR es el rango intercuartílico (definido como $Q_3 - Q_1$). Los *outlier* se definen como aquellos puntos que caen fuera del rango que establecen los límites inferior y superior, A , y A_+ respectivamente.

Una vez que se eliminan los *outlier* del conjunto de datos de entrenamiento, se vuelve a entrenar el modelo. Este proceso de eliminación de *outlier* y entrenamiento del modelo se itera hasta que se alcanza el siguiente criterio de convergencia,

$$\frac{d \text{RMSD}^j}{dj} = 0 \quad (5)$$

siendo RMSD la raíz de la diferencia cuadrática media para la iteración j , que para dos poblaciones de datos X_i (datos estimados) e Y_i (datos medidos) se define como,

$$\text{RMSD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 / n} \quad (6)$$

La aplicación de este método a la estimación de la irradiancia global horizontal horaria para 13 localidades españolas permite el ajuste de modelos más precisos con menos de 10 iteraciones para alcanzar la convergencia (Polo et al., 2006).

2.4 Cálculo del índice de nubosidad. Aproximación heliosat-2

El cálculo del índice de nubosidad requiere de la estimación de las diversas reflectancias de la expresión (1). La radiación electromagnética que recibe el sensor del satélite es la suma de la retrodispersión de la radiación solar en la atmósfera y la reflexión en la superficie terrestre (en condiciones de cielo despejado) ó en la superficie de la cubierta nubosa. Por tanto, se pueden plantear las siguientes ecuaciones básicas para el albedo planetario instantáneo en condiciones de cielo despejado y cubierto, respectivamente.

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{am} + \Theta(\alpha, T_L) \rho_g \Theta(\alpha_{sat}, T_L) \quad \text{cielo despejado} \\ \rho_{eff} &= \rho_{am} + \Theta(\alpha, T_L) \rho_c \Theta(\alpha_{sat}, T_L) \quad \text{cielo cubierto} \end{aligned} \quad (7)$$

donde Θ es la transmitancia de la atmósfera en condiciones de cielo despejado, que es función del ángulo de elevación del Sol, α , ó del satélite, α_{sat} (dependiendo del camino óptico que se aplique) y del factor de turbidez de Linke, como regulador de la

atenuación atmosférica adicional a la dispersión Rayleigh; ρ_{atm} es la reflectancia o albedo de la atmósfera.

Estas ecuaciones permiten estimar el albedo terrestre y el albedo de las nubes, que actúan como condiciones extremas en la estimación del índice de nubosidad a través de la ecuación (1). En este trabajo se ha tomado como referencia el modelo heliosat-2 (Rigollier et al., 2004), que se puede considerar como un modelo híbrido que adopta el modelo del ESRA (European Solar Radiation Atlas) para estimar la transmitancia atmosférica en condiciones de cielo despejado (Rigollier et al., 2000).

En condiciones de cielo despejado el albedo terrestre se relaciona con el albedo planetario instantáneo por,

$$\rho_g = \frac{(\rho - \rho_{atm})}{t(\alpha, T_L)t(\alpha_{at}, T_L)} \quad (8)$$

El albedo planetario instantáneo se estima en todo momento a partir del registro de radiancia en el sensor del satélite ,

$$\rho = \frac{\pi L}{\varepsilon I_0^{met} \text{sen} \alpha} \quad (9)$$

siendo I_0^{met} la irradiancia extraterrestre integrada en el rango espectral del canal visible del sensor MVIRI.

El albedo de la atmósfera es consecuencia de la retrodispersión de la radiación solar en la atmósfera. Asumiendo scattering isótropo, la radiancia que detecta el sensor procedente de la retrodispersión atmosférica puede estimarse como función de la irradiancia difusa en condiciones de cielo despejado del modelo ESRA (D_C),

$$L_{atm} = \frac{D_C}{I_{SC}} \frac{I_0^{met}}{\pi} (0.5 / \text{sen} \alpha_{sat})^{0.8} \quad (10)$$

donde I_{SC} es la constante solar. Así, en analogía con la expresión (9) el albedo de la atmósfera viene dado por,

$$\rho_{atm} = \frac{\pi L_{atm}}{\varepsilon I_0^{met} \text{sen} \alpha_{sat}} \quad (11)$$

En la aproximación de heliosat-2 el albedo terrestre se estima mensualmente, para cada píxel de la imagen, como el segundo mínimo de una serie temporal de albedos terrestres (Zarzalejo, 2005), estimados mediante las expresiones (8) a (11).

El albedo de las nubes se estima de forma análoga, a través de,

$$\rho_c = \frac{(\rho_{eff} - \rho_{atm})}{t(\alpha, T_L)t(\alpha_{at}, T_L)} \quad (12)$$

donde el albedo planetario instantáneo correspondiente a cielo cubierto queda determinado como el albedo máximo modulado por una función que depende de la altura solar (Taylor y Stowe, 1984),

$$\rho_{eff} = 0.78 - 0.13 \left[1 - \exp(-4 \text{sen}^5 \alpha) \right] \quad (13)$$

2.5 Modelo de cielo despejado del ESRA

La estimación de las transmitancias atmosféricas que aparecen en las ecuaciones básicas del albedo planetario instantáneo, ecuación (7), se realiza en heliosat-2 mediante el modelo de cielo despejado del ESRA (Rigollier et al., 2000). La transmitancia global se formula como la suma de las transmitancias de las componentes directa (Θ_B) y difusa (Θ_D) de la radiación solar,

$$\begin{aligned} \Theta(\alpha, T_L) &= \Theta_B(\alpha, T_L) + \Theta_D(\alpha, T_L) \\ \Theta(\alpha_{sat}, T_L) &= \Theta_B(\alpha_{sat}, T_L) + \Theta_D(\alpha_{sat}, T_L) \end{aligned} \quad (14)$$

En este modelo de cielo despejado toda la atenuación atmosférica más allá de la dispersión Rayleigh por las moléculas de aire se explica a través de un único parámetro: el factor de turbidez de Linke.

El factor de turbidez de Linke se define como el número de atmósferas limpias y secas, es decir de atmósferas Rayleigh, necesarias tener la atenuación observada de la

radiación solar (Linke, 1922; Louche et al., 1986; Kasten, 1996). Este factor puede obtenerse a partir de medidas de irradiancia directa en tierra y presenta una cierta dependencia con la masa de aire, lo que ha dado lugar a formulaciones alternativas (Ineichen y Perez, 2002).

En el modelo ESRA la irradiancia directa en condiciones de cielo despejado se estima a partir de la ley de Bouguer-Lambert-Beer (Iqbal, 1983), aplicando un factor corrector al exponente y al espesor óptico de dispersión Rayleigh, τ_R , que permite introducir el factor de turbidez de Linke a masa de aire 2, T_L^{AM2} (Geiger et al., 2002; Remund y Page, 2003).

$$B_C = I_{SC} \varepsilon \Theta_B(\alpha, T_L) = I_{SC} \varepsilon \exp(-0.8662 T_L^{AM2} m \tau_R) \quad (15)$$

La dependencia de la transmitancia con la altura solar está implícita en la masa de aire relativa, m , que aparece en el exponente de (15).

La componente difusa de la irradiancia solar de cielo despejado se estima de forma análoga,

$$D_C = I_{SC} \varepsilon \Theta_D(\alpha, T_L) = I_{SC} \varepsilon \Theta_D^z(T_L^{AM2}) F_D(\alpha, T_L^{AM2}) \quad (16)$$

donde Θ_D^z representa la transmitancia de la irradiancia difusa en la dirección cenital, con lo que solo depende del factor de turbidez de Linke,

$$\Theta_D^z = -0.015843 + 0.030543 T_L^{AM2} + 0.000379 (T_L^{AM2})^2 \quad (17)$$

y F_D es una función de corrección angular, que se determina con la siguiente parametrización,

$$F_D(\alpha, T_L^{AM2}) = A_0 + A_1 \text{sen } \alpha + A_2 \text{sen}^2 \alpha$$

$$A_0 = 2.6463 \cdot 10^{-1} - 6.1581 \cdot 10^{-2} T_L^{AM2} + 3.1408 \cdot 10^{-3} (T_L^{AM2})^2$$

$$\text{si } A_0 t_D < 2 \cdot 10^{-3}, A_0 = 2 \cdot 10^{-3} (t_D)^{-1} \quad (18)$$

$$A_1 = 2.0402 - 1.8945 \cdot 10^{-2} T_L^{AM2} - 1.1166 \cdot 10^{-2} (T_L^{AM2})^2$$

$$A_3 = -1.3025 + 3.9231 \cdot 10^{-2} T_L^{AM2} + 8.5079 \cdot 10^{-3} (T_L^{AM2})^2$$

A partir de las expresiones (15) a (18) la irradiancia global horizontal en condiciones de cielo despejado se puede estimar mediante:

$$G_C = B_C \text{sen } \alpha + D_C \quad (19)$$

En la bibliografía se pueden encontrar trabajos en los que se evalúa la respuesta de diversos modelos de cielo despejado con datos experimentales de elevada calidad (Gueymard, 1989; Batlles et al., 2000a; Yang et al., 2001; Gueymard, 2003a; Gueymard, 2003b; Ineichen, 2005; Alam, 2006). En ellos, el modelo ESRA ha mostrado una respuesta muy aceptable con una incertidumbre muy similar a la de modelos más sofisticados. No obstante, cabe señalar que la fuente de incertidumbre más importante de todos los modelos de cielo despejado es la precisión de los parámetros atmosféricos de entrada a los modelos (Batlles et al., 2000a; Ineichen, 2005).

2.6 Estimación de la irradiancia global horizontal

La estimación de la irradiancia global horizontal se realiza por medio de una relación funcional para el índice de cielo despejado en función del índice de nubosidad. El índice de cielo despejado se estima normalizando la irradiancia global horizontal con la correspondiente a cielo despejado,

$$K_C = \frac{G}{G_C} \quad (20)$$

En el método heliosat-2 se asume la relación $1-n$ para un rango amplio del índice de nubosidad, y se corrige dicha relación en los extremos, de manera que la expresión final es (Hammer et al., 2003):

$$\begin{aligned} n < -0.2, & \quad K_C = 1.2 \\ -0.2 \leq n < 0.8, & \quad K_C = 1-n \\ 0.8 \leq n < 1.1, & \quad K_C = 2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \\ 1.1 \leq n & \quad , \quad K_C = 0.05 \end{aligned} \quad (21)$$

Es importante observar que la hipótesis de la relación $1-n$ planteada para el índice de cielo despejado en el rango más característico de variación del índice de nubosidad

otorga a heliosat-2 un carácter más físico que estadístico. En este sentido, esta hipótesis plantea el índice de nubosidad como la absortancia de las nubes para la irradiancia global y emplea la estadística para corregir este comportamiento en las regiones más extremas del índice de nubosidad. Asimismo, esta hipótesis es la base de la universalidad de heliosat-2 según sus autores (Cross et al., 2004; Rigollier et al., 2004). Esta hipótesis es cuestionable debido a las incertidumbres asociadas a la estructura tridimensional de las nubes (Girodo et al., 2006) y al carácter anisótropo de la dispersión real de la radiación solar en la atmósfera, especialmente en el caso de dispersión Mie por partículas suspendidas en la atmósfera (aerosoles y cristales de hielo).

En el Anexo IV (Zarzalejo et al., 2009b) se presenta un análisis del comportamiento del índice de cielo despejado usando datos horarios de irradiancia global horizontal de 28 estaciones españolas de la AEMet. Además se correlaciona con el análisis del comportamiento del índice de nubosidad para estas mismas localidades, estimado de acuerdo a la aproximación heliosat-2 con las imágenes de alta resolución del canal visible de Meteosat. En la Figura 3 se presenta gráficamente el análisis estadístico del comportamiento de K_C y n para estas localidades, ordenadas por latitud, a través de un gráfico Box & Whisker. Los gráficos Box & Whisker ofrecen información sobre los principales momentos de la distribución de una población (mediana, percentiles 25 y 75, y rango intercuartil).

En la Figura 3 se aprecia la relación de inversa proporcionalidad entre K_C y n , ya constatada por los autores de heliosat-2. Además, se aprecia que los momentos de la función de distribución evolucionan con la latitud del lugar. En estudios más detallados sobre las características estadísticas de la radiación solar, la dependencia de la distribución del índice diario de transparencia atmosférica con la climatología muestra distribuciones bimodales en las regiones con más nubosidad y unimodales en las zonas menos nubosas (Tovar et al., 1998; Tovar et al., 2001; Tovar, 2008).

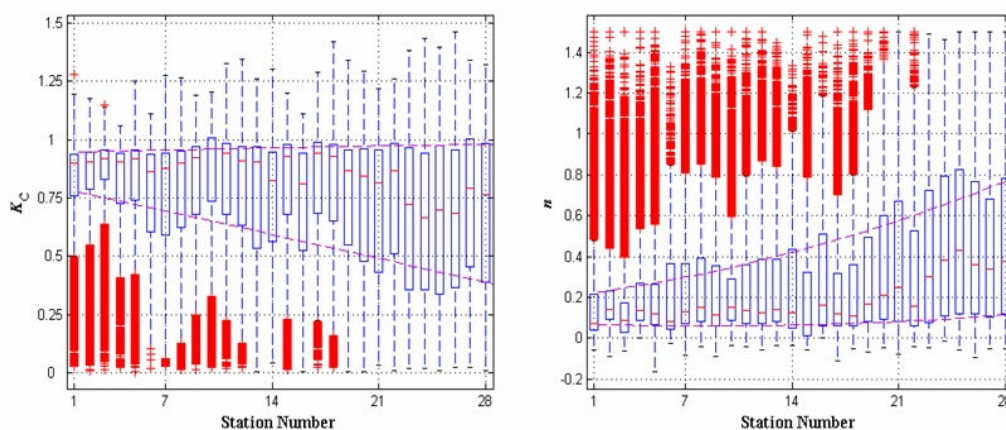


Figura 3. Box & Whisker plot para el índice de cielo despejado y el índice de nubosidad en 28 estaciones españolas (Zarzalejo et al., 2009a)

Los resultados de éste análisis estadístico para las 28 localidades españolas sugieren que la relación funcional entre K_C y n puede mejorarse si se incluye algún parámetro relacionado con la función de distribución del índice de nubosidad. En el Anexo IV

(Zarzalejo et al., 2009b) se propone un modelo que mejora la relación entre K_C y n propuesta en la expresión (21). Para ello, se estudia la inclusión de parámetros como la mediana y los percentiles 25 y 75, así como el efecto de la masa de aire. Además, para la generación de modelos a partir de los datos medidos en 28 estaciones de tierra se ha hecho uso del algoritmo iterativo de selección de los datos de entrenamiento, descrito en el Anexo III (Polo et al., 2006).

El modelo que finalmente se emplea para la estimación de la irradiancia global horizontal a partir del índice de nubosidad es el siguiente:

$$K_C = \frac{G}{G_C} = 1.010 - 0.789n + 0.153n_{50} - 0.025m \quad (22)$$

donde n_{50} representa la mediana de la distribución del índice de nubosidad para cada píxel durante el periodo 1994-2005, m es la masa relativa de aire y G_C es la irradiancia global horizontal para cielo despejado del modelo ESRA, expresión (19). Este modelo presenta una respuesta notablemente mejor que la aproximación original de heliosat-2, expresión (21), al evaluarlo con los datos de estaciones españolas.

La determinación de la irradiancia global horizontal horaria para el periodo 1994-2005 consiste en la estimación del índice de nubosidad para todo ese periodo y el valor de la mediana del mismo, para posteriormente hacer uso de la expresión (22). A partir de cinco imágenes por día, asociadas a cinco intervalos horarios distintos, y un post-proceso basado en una interpolación con splines se pueden generar perfiles horarios desde el orto al ocaso solar para todo el periodo de 1994 al 2005.

2.7 Metodología de selección de días despejados

Existen numerosos estudios sobre radiación solar en los conviene poder identificar condiciones de cielo despejado. Varios autores han definido condiciones de cielo despejado para intervalos horarios a partir del índice de transparencia atmosférica K_T y de la fracción de irradiancia difusa K_D (Orgill y Hollands, 1977; Erbs et al., 1982; Reindl et al., 1990). Estos métodos presentan el problema de la dependencia de ambos índices, K_T y K_D , con la altura solar y existen algunas propuestas alternativas (Batlles et al., 2000a). Long y Ackerman presentan un método basado en medidas al minuto de irradiancia global y difusa que presenta, para su uso en la selección de días completos, la dificultad de ser un método iterativo (Long y Ackerman, 2000).

Se ha desarrollado un método sencillo y operativo para la identificación de días completos de cielo despejado basado en la aplicación del modelo de cielo despejado del ESRA, que ha sido además corroborado con medidas espectrales de irradiancia directa en la Plataforma Solar de Almería (Polo et al., 2009b). En los Anexos V y VI se describen trabajos que han hecho uso de este modelo de selección de días despejados.

El modelo de selección de días despejados se basa en la comparación, para un día completo, de la serie de irradiancia global horizontal horaria, G , con la serie de irradiancia global horizontal estimada con el modelo ESRA para ese mismo día, G_C , asumiendo un valor característico o esperable para el factor de turbidez de Linke. El conocimiento preciso del factor de turbidez de Linke no es determinante en la aplicación de este modelo pero, en ausencia de datos más precisos, conviene emplear valores de la turbidez de Linke que tengan sentido físico.

Para cada día se calcula la matriz de coeficientes de correlación (Petrucci et al., 1999) de las series de irradiancia global horizontal estimada por el modelo de satélite y la serie teórica de cielo despejado estimada con el modelo ESRA,

$$C = \begin{pmatrix} r_{GG} & r_{GG_C} \\ r_{G_CG} & r_{G_CG_C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & r_{GG_C} \\ r_{G_CG} & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$r_{G_CG} = r_{GG_C} = \frac{\text{cov}(G, G_C)}{\sigma_G \sigma_{G_C}}$$

donde cov es la covarianza y σ es la desviación estándar. El determinante de la matriz de coeficientes de correlación se puede usar como medida del grado de correlación que hay entre las dos series de irradiancia. Si se tratara de la misma serie de irradiancia el determinante de la matriz C sería nulo. En el caso real cuanto más cercano a cero sea el valor de dicho determinante mayor correlación existirá entre las series de irradiancia. El criterio que se establece finalmente para seleccionar un día despejado es que el determinante de la matriz C sea inferior o igual a un valor umbral de 0.005, (Polo et al., 2009b).

2.8 Estimación de la irradiancia directa

La escasa disponibilidad de medidas de irradiancia directa comparada con el alcance de las bases de datos de irradiancia global horizontal ha provocado la proliferación de diversos modelos y correlaciones para transformar la irradiancia global horizontal en directa (Maxwell, 1987; Perez et al., 1990; Batlles et al., 2000b; de Miguel et al., 2001; Muneer et al., 2004; Ineichen, 2008b). En la bibliografía se encuentran desde los más sencillos modelos de descomposición hasta modelos que añaden la influencia de variables como la altura solar o que incluyen parcialmente la formulación de las condiciones de cielo despejado.

El análisis de la respuesta de diversos modelos de este tipo junto con modelos de transmitancia para cielo despejado en varias estaciones españolas (Batlles et al., 2000c) concluye que los modelos de descomposición son la mejor opción cuando no hay información disponible de la turbidez atmosférica, mientras que en caso contrario es preferible el uso de modelos de transmitancia. De forma análoga otros autores abogan

por la mejor respuesta de los modelos de transmitancia en condiciones de cielo despejado y con información precisa de la turbidez (Gueymard, 2005).

La estimación de la irradiancia directa para cielos no despejados se realiza con un modelo de descomposición a partir de la estimación de la irradiancia global con imágenes de satélite. El modelo de descomposición que se emplea es el de Louche (Louche et al., 1991) ya que es sencillo de implementar y ha demostrado buenos resultados al evaluarlo frente a datos en estaciones españolas (Batlles et al., 2000d). Este modelo se basa en correlacionar la transmitancia directa con el índice de transparencia atmosférica,

$$K_B = \frac{B}{I_{SC}\mathcal{E}} = -10.627 K_T^5 + 15.307 K_T^4 - 5.205 K_T^3 + 0.994 K_T^2 - 0.059 K_T + 0.002 \quad (24)$$

Las observaciones sobre el uso de modelos de descomposición y de transmitancia encontradas en los trabajos de Batlles y Gueymard (Batlles et al., 2000e; Gueymard, 2005) conducen al planteamiento de la segunda aproximación al problema de estimar las componentes de la irradiancia solar a partir de imágenes de satélite.

Sobre la estimación de la irradiancia global horizontal a partir de las imágenes de satélite se aplica el modelo de detección de días de cielo despejado comentado anteriormente: si el día no es despejado se aplica el modelo de Louche para estimar la irradiancia directa a partir de la global, si el día es despejado se emplea el modelo ESRA de cielo despejado para la estimación tanto de la irradiancia global horizontal como para la irradiancia directa.

Para el modelo ESRA de cielo despejado se emplean las medias mensuales del factor de turbidez de Linke del mapa mundial (Remund et al., 2003) generado en el proyecto SoDa (Integration and exploitation of networked Solar radiation databases for environment monitoring. Contract Number: ST-1999-12245 de la Unión Europea). Se emplea como factor de turbidez de Linke los valores diarios que resultan de la interpolación lineal de las medias mensuales con el día juliano.

2.9 Estimación local del factor de turbidez de Linke

La contribución más importante al factor de turbidez de Linke se debe sin duda a la atenuación de la radiación solar por los aerosoles atmosféricos. Esta se puede caracterizar adecuadamente por la turbidez de Angstrom y el parámetro de exponente, ya que el conocimiento de éstos permite estimar el espesor óptico a las distintas longitudes de onda de interés (Gueymard, 1998; Gueymard, 2005). Existen diversas formulaciones que correlacionan el factor de turbidez de Linke con el espesor óptico de aerosoles (Ineichen, 2008c). Los parámetros de Angstrom se suelen determinar por fotometría ó espectrorradiometría a partir de medidas espectrales de irradiancia directa. En particular, la red de fotometría solar AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) se ha convertido en una herramienta de gran valor como base de datos del espesor óptico de

aerosoles en el mundo (Holben et al., 1998). Muchos de estos estudios aportan información sobre el comportamiento dinámico de los aerosoles en distintos lugares del planeta.

En el Anexo V (Polo et al., 2009b) se presenta un estudio de espectrorradiometría solar para determinar la evolución de la turbidez atmosférica de Angstrom en la Plataforma Solar de Almería; en él se encuentra que la turbidez atmosférica puede presentar una evolución altamente variable como consecuencia de los distintos tipos de aerosoles atmosféricos que se puedan encontrar y las intrusiones de partículas gruesas provenientes del Sahara.

Como consecuencia de estas consideraciones cabría esperar que el factor de turbidez de Linke tenga una variabilidad dinámica considerable y que los valores mensuales que SoDa facilita (<http://www.soda-is.com/eng/index.html>) conlleven a una determinación imprecisa de la irradiancia solar en condiciones de cielo despejado. En el Anexo VI (Polo et al., 2009a) se presenta un modelo para determinar el factor de turbidez de Linke a partir de datos de irradiancia global horizontal a mediodía solar, que ha sido validado con datos de estaciones de la BSRN y de AEMet.

El modelo de estimación del factor de turbidez de Linke a partir de la irradiancia global parte de la siguiente hipótesis: el factor de turbidez de Linke diario obtenido de la interpolación lineal de las medias mensuales que suministra el servicio SoDa, T_L^{SoDa} , es una aproximación incierta al factor de turbidez de Linke real, T_L^{real} . Ante esta hipótesis se podría emplear un modelo de cielo despejado, como el de ESRA, para evaluar las componentes global y directa de la irradiancia solar con los valores de T_L^{SoDa} y T_L^{real} , respectivamente.

Con el objetivo de encontrar una relación funcional entre estos cuatro valores de la irradiancia se han empleado datos de elevada calidad de una estación BSRN (Carpentras). Para esta localidad se ha estimado la irradiancia global y directa con el modelo ESRA empleando el factor de turbidez de Linke de SoDa. Las irradiancias correspondientes a valor real del factor de turbidez de Linke son los valores medidos en la estación en condiciones de cielo despejado. El análisis de estos datos muestra que el cociente entre la estimación de la irradiancia directa con ESRA y la medida en el mediodía solar tiene una elevada correlación con ese mismo cociente para la irradiancia global a mediodía solar. Se propone, por tanto, la siguiente correlación para ambos cocientes evaluados a mediodía solar,

$$\Delta B_C = \frac{B_C(T_L^{SoDa})}{B_C(T_L^{real})} = 7.52 \Delta G_C^3 - 18.53 \Delta G_C^2 + 16.80 \Delta G_C - 4.79$$

$$\Delta G_C = \frac{G_C(T_L^{SoDa})}{G_C(T_L^{real})} \quad (25)$$

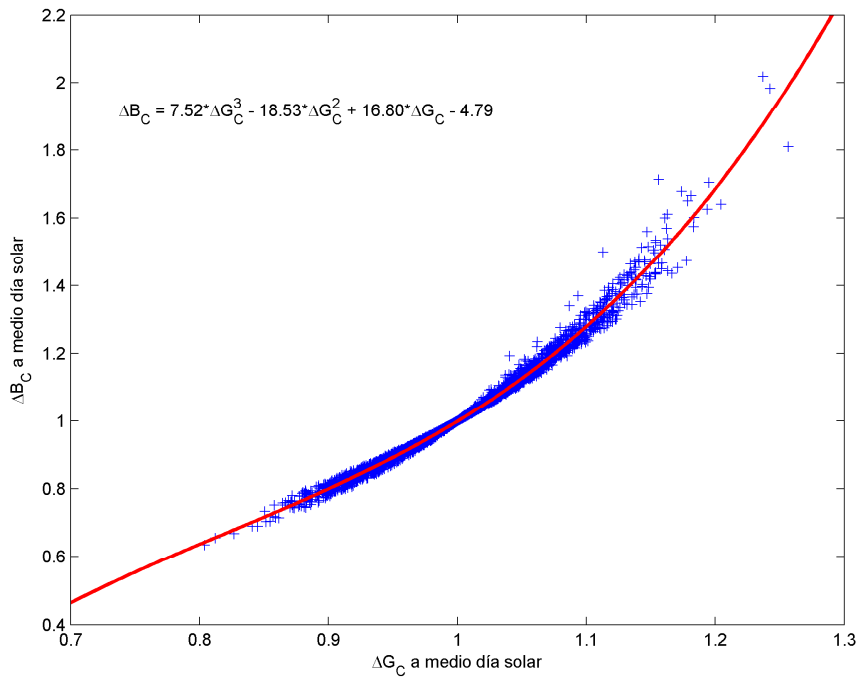


Figura 4. Correlación entre el cociente de irradiancia global de ESRA y la medida, y el mismo cociente para irradiancia directa a mediodía solar en la estación BSRN de Carpentras (Polo et al., 2009a).

Aplicando las ecuaciones del modelo de cielo despejado ESRA para la irradiancia directa se puede encontrar una expresión para estimar el factor de turbidez de Linke en función del promedio mensual suministrado por SoDa y de medidas de irradiancia global a mediodía solar ,

$$T_L^{real} = T_L^{SoDa} + \Delta T_L = T_L^{SoDa} + \frac{1}{0.8662 \tau_{Rm}} \log(\Delta B_C) \quad (26)$$

La aplicación del modelo de estimación del factor de turbidez de Linke a partir de medidas de irradiancia global para tres estaciones BSRN se muestra en la Figura 5 donde se pueden comparar los valores de la turbidez de Linke suministrados por SoDa con los nuevos valores corregidos. En ella se puede apreciar un comportamiento más dinámico de los nuevos factores de turbidez que además cambian anualmente. Este método ofrece la ventaja de ser un estimador dinámico y más preciso del factor de turbidez de Linke y más realista que el servicio SoDa que suministra 12 únicos valores medios mensuales de la turbidez de Linke.

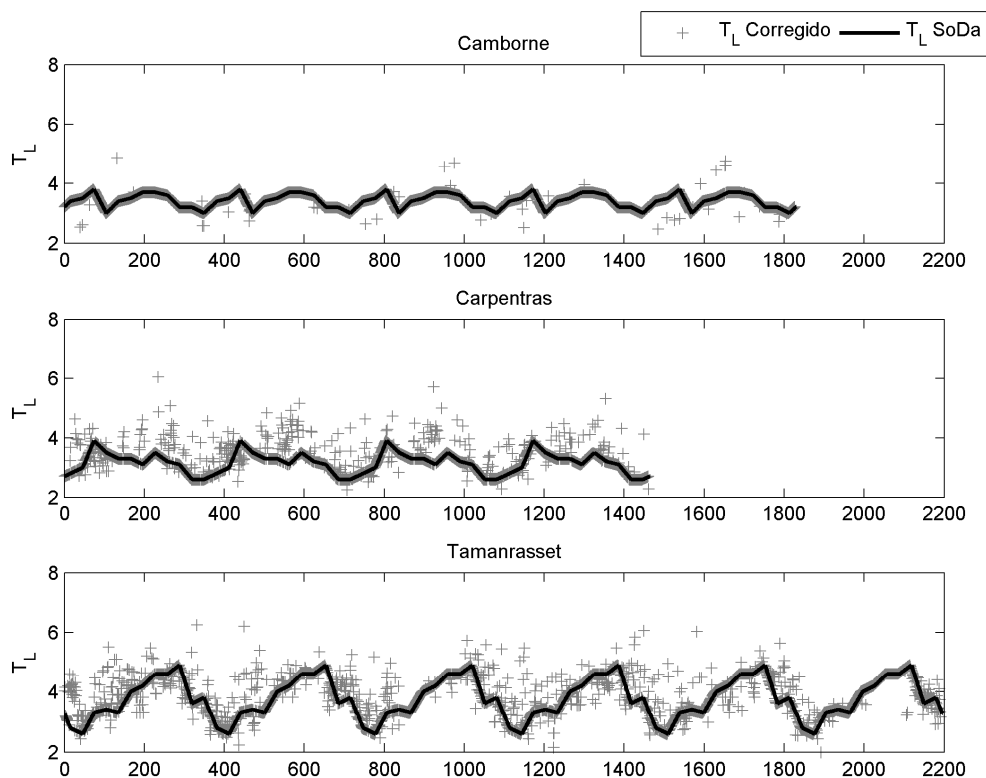


Figura 5. Factor de turbidez de Linde diario obtenido a partir de medidas de irradiancia global comparado con los valores suministrados por el servicio SoDa (Polo et al., 2009a).

La evaluación de este modelo de cálculo del factor de turbidez de Linde se ha realizado a través de la estimación de la irradiancia global y directa de cielo despejado con ESRA utilizando los valores del factor de turbidez de Linde disponibles en SoDa y los nuevos valores propuestos, frente a las medidas en condiciones de cielo despejado en estaciones BSRN y AEMet. La Tabla 1 muestra como se reduce la incertidumbre al usar los nuevos factores de turbidez para las estaciones BSRN, en términos de RMSD relativo, que disminuye para todo el conjunto de datos del 4.7% al 3.0% en irradiancia global y del 17.1% al 14.2% en irradiancia directa. Con los datos registrados en estaciones AEMet también se ha observado un mayor acuerdo en la estimación de la irradiancia de cielo despejado.

Los resultados del modelo de estimación del factor de turbidez de Linde sugieren una tercera aproximación en la estimación de las irradiancias global y directa por satélite. Esta consiste en usar la información de satélite para detectar días despejados y estimar el factor de turbidez de Linde, con el que se pueden recalcular las irradiancias. Para estimar en nuevo factor de turbidez de Linde se emplea la estimación de la irradiancia global por satélite en el intervalo horario de 13-14 horas, ya que en este intervalo se comprueba que la precisión del modelo de satélite para la irradiancia global es mayor en términos de RMSD y la desviación media es prácticamente nula (Figura 6).

Tabla 1. Comparación de las irradiancias global y directa estimadas con ESRA usando el modelo de estimación del factor de turbidez de Linke

Estación	RMSD (%) Global horizontal		RMSD (%) Directa	
	T_L^{SoDa}	$T_L^{SoDa} + \Delta T_L$	T_L^{SoDa}	$T_L^{SoDa} + \Delta T_L$
Camborne	4.5	2.8	12.9	10.3
Carpentras	4.8	2.0	12.0	8.7
Tamanrasset	4.6	3.0	18.9	15.8
Total	4.7	3.0	17.1	14.2

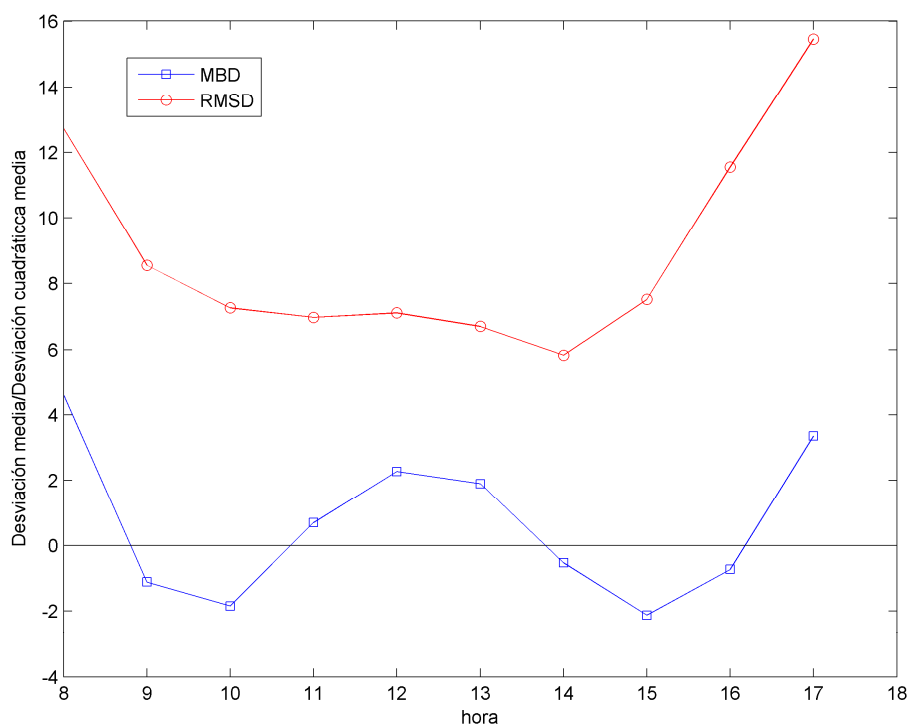


Figura 6. RMSD y MBD de la estimación de la irradiancia global a partir de satélite en función de la hora

2.10 Evaluación de la metodología en condiciones de cielo despejado

Para la evaluación de esta metodología se han usado los datos horarios y simultáneos de las irradiancias global horizontal y directa normal registrados en dos estaciones AEMet durante el periodo 2000-2004: Madrid y Murcia.

La Figura 7 muestra los valores del factor de turbidez de Linke estimados a partir de la información de satélite en condiciones de cielo despejado, comparado con los valores estacionarios que ofrece SoDa. Se observa que los nuevos factores de turbidez de Linke son más elevados que aquellos derivados de las medias mensuales de SoDa, especialmente durante el periodo estival.

Los datos suministrados por SoDa son el resultado de una extrapolación espacial con datos experimentales de diversas fuentes (Remund et al., 2003), entre las que destaca AERONET (Holben et al., 1998); cabe destacar que en las fechas en las que se elaboró el mapa mundial de turbidez de Linke para SoDa existían en España solo dos estaciones de medida integradas en AERONET, en consecuencia los promedios mensuales de la turbidez de Linke que suministra SoDa para la geografía española pueden tener una incertidumbre importante cuando se usan para cuantificar el factor de turbidez de Linke diario.

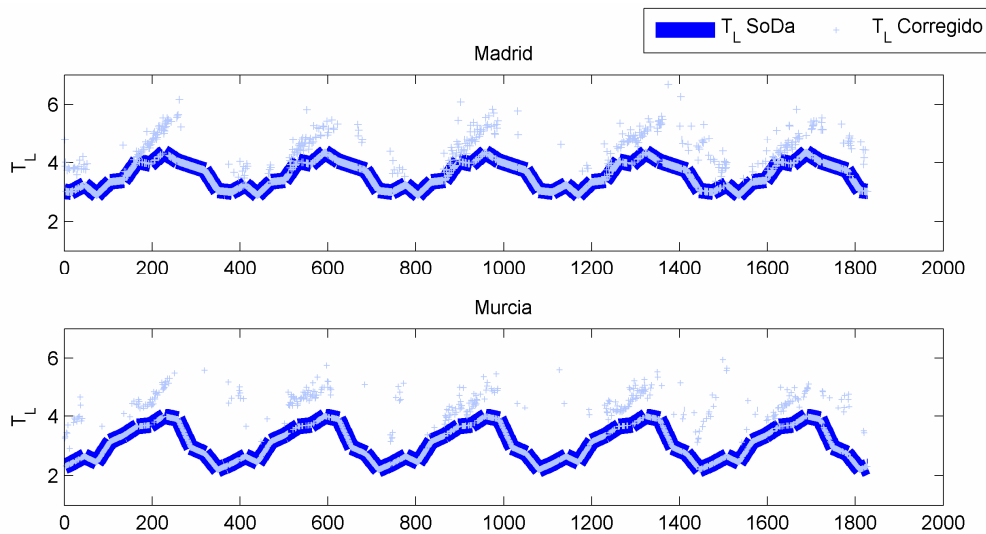


Figura 7. Nuevos valores del factor de turbidez de Linke estimados a partir de imágenes de satélite en condiciones de cielo despejado.

La evaluación de las estimaciones de la irradiancia solar con los nuevos factores de turbidez de Linke se ha realizado en términos de parámetros basados en las distancias entre los valores estimados y los medidos (RMSD y MBD) así como aplicando el test de Kolmogorov-Smirnov (Massey F.J.Jr., 1951; Press et al., 1988).

El test de Kolmogorov-Smirnov se basa en la comparación de las distribuciones de probabilidad de los datos estimados y medidos, estableciendo un test de hipótesis del que se puede estudiar la incertidumbre o bondad de un modelo en función de cuanto se separan las distribuciones de probabilidad de ambas poblaciones. Se define el estadístico D_n como la diferencia entre las distribuciones de probabilidad de la población que se somete al test y la de referencia (que determinan los datos experimentales). Asimismo, establece un valor umbral para la máxima diferencia de las distribuciones de probabilidad necesaria para superar el test.

En el anexo VII (Espinar et al., 2009) se describe con detalle el uso del test de Kolmogorov-Smirnov y se presenta un ejemplo de evaluación de modelos de estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite para un gran número de estaciones de medida alemanas. En él se presentan diversas formulaciones alternativas para usar el test de Kolmogorov-Smirnov que pueden ofrecer información valiosa sobre la incertidumbre de un modelo, ya que la formulación originaria de este test estadístico es muy exigente para su empleo en modelos de radiación solar donde las incertidumbres son importantes.

La Tabla 2 presenta las incertidumbres en términos de RMSD y MBD de la estimación de la irradiancia solar para las localidades de Madrid y Murcia. En ella se observa una importante reducción de la incertidumbre para la irradiancia global horizontal, y una ligera reducción de la incertidumbre en el caso de la irradiancia directa.

Tabla 2. RMSD y MBD de la estimación de las irradiancias global y directa a partir de los nuevos factores de turbidez de Linke obtenidos con la información de satélite

Estación	MBD (%) Global horizontal		MBD (%) Directa	
	T_L^{SoDa}	$T_L^{SoDa} + \Delta T_L$	T_L^{SoDa}	$T_L^{SoDa} + \Delta T_L$
Madrid	2.6	0.1	9.5	7.1
Murcia	2.7	0.5	2.8	1.6
Estación	RMSD (%) Global horizontal		RMSD (%) Directa	
	T_L^{SoDa}	$T_L^{SoDa} + \Delta T_L$	T_L^{SoDa}	$T_L^{SoDa} + \Delta T_L$
Madrid	5.8	5.0	16.9	15.1
Murcia	5.2	4.6	16.4	15.9

La Figura 8 muestra, de forma gráfica, los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para la estimación de la irradiancia global y directa en condiciones de cielo despejado usando el valor original de la turbidez de Linke (suministrado por SoDa) y el valor corregido usando la información de satélite. Los gráficos muestran, además, el valor umbral para superar el test estadístico en forma de línea punteada.

En el caso de la irradiancia global la evolución del estadístico D_n para Madrid y Murcia se sitúa siempre por debajo del valor umbral cuando se usan los valores corregidos del factor de turbidez de Linke. Esto indica que en todo el rango de variación de la irradiancia solar el modelo con los nuevos valores de la turbidez de Linke supera los requisitos del test, pudiéndose afirmar que las dos poblaciones de datos (medidos y obtenidos con el modelo) corresponden a una misma distribución de probabilidad, es decir, que a ambas muestras de datos les corresponde la misma ley.

En los casos de irradiancia directa las incertidumbres son notablemente mayores y no se superan las exigentes condiciones del test estadístico. Sin embargo, cabe señalar que las distancias entre las distribuciones de probabilidad, valores de D_n , disminuyen al emplear los nuevos factores de turbidez indicando con ello una mejor respuesta del modelo.

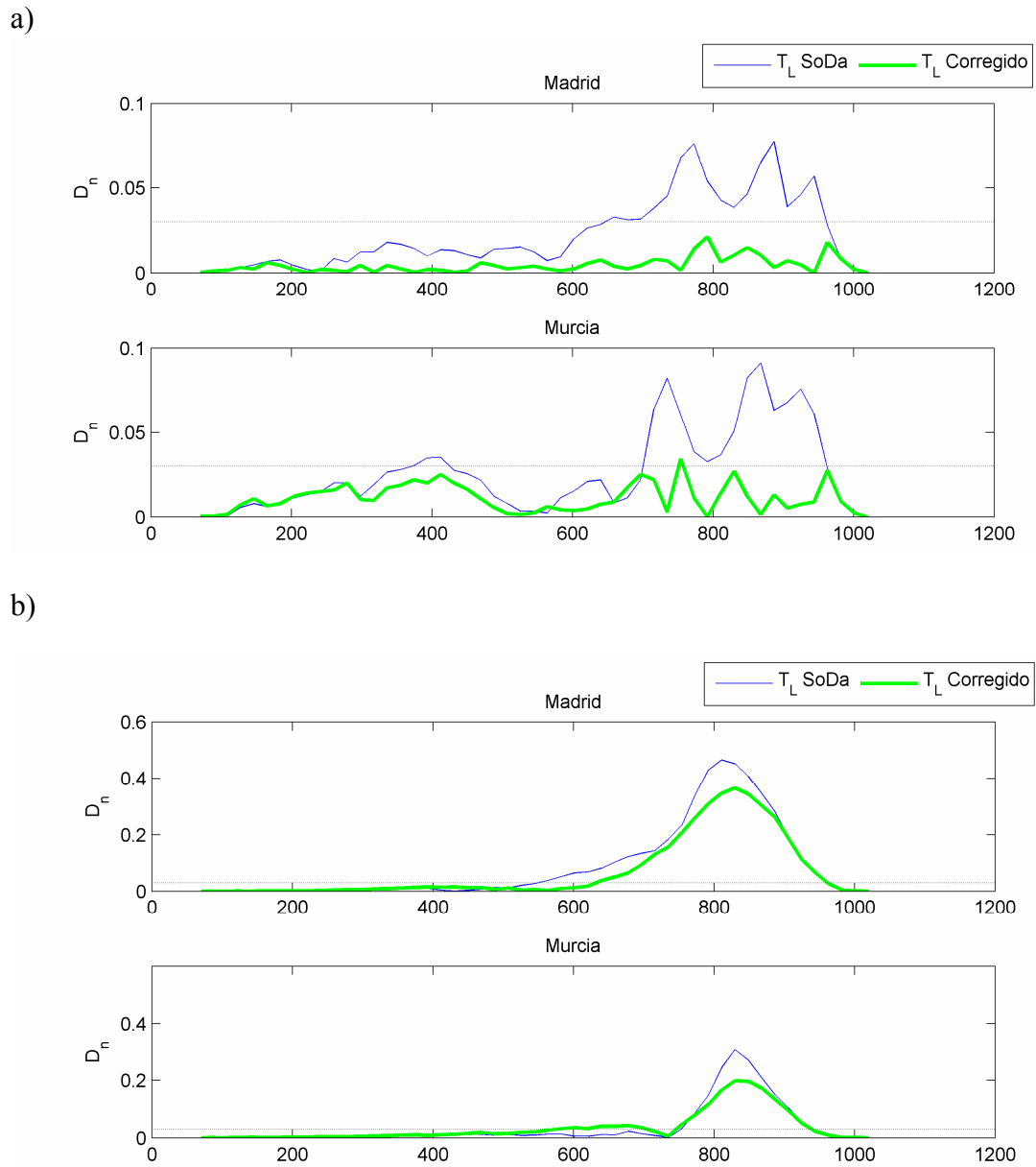


Figura 8. Estadístico del test de Kolmogorov-Smirnov usando el factor de turbidez de Linke de SoDa y el factor de turbidez estimado a partir de satélite: a) irradiancia global, b) irradiancia directa

3. CONCLUSIONES

La radiación solar incidente en la superficie de la Tierra es una variable física de elevado interés en muchas áreas relacionadas con el medioambiente y la energía. Además, con el desarrollo tecnológico de la energía solar en los últimos años se hace más patente la necesidad de disponer de series temporales precisas de irradiación solar global y directa. Si bien la disponibilidad de datos experimentales ha aumentado y mejorado sustancialmente en los últimos años, la incertidumbre resultante de la interpolación espacial de éstos es, con diferencia, mucho mayor que aquella que resulta del uso de las imágenes de satélites geoestacionarios. Así, la metodología de estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite se ha mostrado como el mejor método para obtener valores de la irradiancia solar sobre grandes áreas.

En el contexto de esta tesis se presenta una metodología basada en el uso secuencial de diversos métodos que permiten generar series temporales de datos horarios de irradiancia global horizontal y directa normal para cualquier punto de la geografía española, haciendo uso de imágenes de alta resolución del canal visible del satélite Meteosat.

La estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite se basa en el concepto de índice de nubosidad como parámetro que gobierna la atenuación de la radiación solar que finalmente incide en la superficie terrestre. En este trabajo se ha tomado como referencia la aproximación de heliosat-2 al cálculo del índice de nubosidad y se ha explorado la dependencia del índice de nubosidad con los parámetros adimensionales de la irradiancia global horizontal. En relación a este punto cabe señalar las siguientes conclusiones:

El desarrollo de modelos estadísticos que expliquen la relación funcional entre el índice de nubosidad y la irradiancia global puede beneficiarse de las técnicas de inteligencia artificial. Aprovechando esta idea se ha desarrollado un algoritmo iterativo para la selección más apropiada de los datos de entrenamiento para modelos, que se ha empleado en la generación del modelo que relaciona el índice de cielo despejado y el índice de nubosidad.

La relación entre el índice de nubosidad y la irradiancia global horizontal puede considerarse multilineal incluyendo momentos de la distribución de probabilidad del índice de nubosidad (la mediana) y la masa de aire.

Los modelos de estimación de la irradiancia directa normal pueden agruparse genéricamente en dos clases: los modelos de descomposición o de conversión mediante correlaciones de la irradiancia global a la directa y los modelos físicos de transmitancia. Los primeros emplean datos de la irradiancia global horizontal para estimar la irradiancia directa normal. Los modelos de transmitancia suelen aplicarse a situaciones de cielo despejado y necesitan de los parámetros atmosféricos que caractericen la atenuación de la radiación solar en la atmósfera. Diversos trabajos han mostrado que los modelos de transmitancia son más precisos en situaciones de cielo despejado, si se dispone de información atmosférica precisa, que los modelos de descomposición. Por

otro lado, los modelos de descomposición basados en la estimación de la fracción de difusa como paso previo hacia el cálculo de la irradiancia directa pueden presentar problemas en la desproyección de las componentes a elevaciones solares bajas. Las principales conclusiones respecto de la estimación de la irradiancia directa normal son:

La metodología más adecuada en la estimación de la irradiancia directa normal es el uso de modelos de transmitancia en condiciones de cielo despejado y el uso de modelos de conversión para el resto de las condiciones de cielo. El uso de esta metodología requiere el poder distinguir entre días despejados y días variables.

Se ha desarrollado un algoritmo para la detección de condiciones de cielo despejado que trabaja sobre días completos. El algoritmo es capaz de distinguir entre días despejados y días con variabilidad a partir de cuantificar diariamente la correlación existente entre el perfil horario de la irradiancia global medida o estimada con satélite y la irradiancia global de cielo despejado estimada con un modelo de transmitancia como el ESRA.

Se propone el uso del modelo de Louche para la estimación de la irradiancia directa normal a partir de la global proveniente de la información satelital en condiciones de cielos variables y el modelo de ESRA para estimar la directa normal en condiciones de cielo despejado.

El uso de modelos de transmitancia para estimar la radiación solar en condiciones de cielo despejado requiere de parámetros que cuantifiquen la atenuación de la radiación solar. En el caso del modelo ESRA toda la atenuación adicional a la dispersión Rayleigh se regula mediante un único parámetro: el factor de turbidez de Linke. Esto presenta ciertas ventajas y también inconvenientes, ya que si bien simplifica mucho el modelo al depender de un único parámetro, la incertidumbre es mayor al agrupar la atenuación de los distintos componentes atmosféricos (fundamentalmente los aerosoles y el vapor de agua) en un solo parámetro atenuador de la radiación solar. En relación con la turbidez atmosférica y en particular con el factor de turbidez de Linke se pueden señalar como conclusiones:

La turbidez atmosférica puede presentar importantes variaciones a lo largo del año como consecuencia de la dinámica de los aerosoles en la atmósfera. El estudio de los parámetros de Angstrom por espectrorradiometría en la PSA concluye, acorde con trabajos similares de otros autores, que la turbidez puede experimentar un notable aumento en el periodo estival. Además, los fenómenos de intrusión de polvo Sahariano son frecuentes en la geografía española y se ha podido constatar su influencia en el comportamiento dinámico de la turbidez.

La información disponible sobre el factor de turbidez de Linke se limita a los promedios mensuales (12 valores suministrados por SoDa) durante un solo año de referencia para todo el mundo. Esta información es muy valiosa por su amplia cobertura espacial, pero puede conducir a importantes incertidumbres en la estimación de la radiación solar directa en condiciones de cielo despejado.

Se ha desarrollado y se propone un método para corregir los valores de la turbidez que suministra SoDa que permite estimar nuevos valores diarios del factor de turbidez de Linke en condiciones de cielo despejado.

La evaluación de la metodología con los nuevos valores corregidos del factor de turbidez de Linke ha mostrado una importante reducción de la desviación cuadrática media en la estimación de la irradiancia global y directa normal para condiciones de cielo despejado.

Los resultados obtenidos en este trabajo abren nuevas líneas de trabajo en relación con la estimación de las componentes de la radiación solar a partir de las imágenes de satélite y con el conocimiento general del recurso solar en la superficie terrestre. En este sentido cabe señalar las siguientes:

Construcción de años meteorológicos tipo. La posibilidad de disponer de series temporales de valores horarios de irradiancia global horizontal y directa normal durante 12 años permite la construcción de un año meteorológico tipo, en el lugar deseado, teniendo en cuenta únicamente las variables de la radiación solar. Esta línea es de gran interés para el dimensionamiento y simulación de la producción de electricidad de las plantas termosolares.

Generación de mapas de irradiancia global horizontal y directa normal en la geografía española. Las series temporales de datos de irradiancia solar pueden ser introducidas como una capa adicional a un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de mapas que presenten datos de radiación solar junto con información adicional de interés en el campo de la energía solar.

Extensión de la metodología a la región del Índico. En la actualidad las plataformas Meteosat de primera generación (hasta el Meteosat 7) están operando en el océano Índico, ya que en la ventana normal de operación trabaja el MSG (Meteosat Segunda Generación). La metodología aquí expuesta puede, por tanto, exportarse para estimar la radiación solar en el sur de Asia, de interés por su potencial desarrollo inminente del uso de la energía solar.

Actualización hacia el MSG. Las mejoras en términos de resolución espacial, temporal y espectral de las imágenes del Meteosat Segunda Generación requieren de un proceso de adaptación y desarrollo de esta metodología. Esto permitirá disponer de valores de la irradiancia solar desde el 2006 en adelante, ampliando notablemente la base de datos de irradiancia solar a partir de satélite. Esta adaptación permitirá asimismo aplicaciones encaminadas hacia la predicción de la irradiancia solar, de enorme interés para la gestión de la producción de electricidad de origen solar.

4. REFERENCIAS

- Alam, S., 2006. Prediction of direct and global solar irradiance using broadband models: validation of REST model. *Renewable Energy* 31, 1253-1263.
- Batlles, F. J., Olmo, F. J., Tovar, J. y Alados-Arboledas, L., 2000a. Comparison of cloudless sky parameterizations of solar irradiance at various spanish midlatitude locations. *Theor. Appl. Climatol.* 66, 81-93.
- Batlles, F. J., Rubio, M. A., Tovar, J., Olmo, F. J. y otros, 2000b. Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance. *Energy* 25, 675-688.
- Batlles, F. J., Rubio, M. A., Tovar, J., Olmo, F. J. y otros, 2000c. Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance. *Energy* 25, 675-688.
- Batlles, F. J., Rubio, M. A., Tovar, J., Olmo, F. J. y otros, 2000d. Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance. *Energy* 25, 675-688.
- Batlles, F. J., Rubio, M. A., Tovar, J., Olmo, F. J. y otros, 2000e. Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance. *Energy* 25, 675-688.
- Cano, D., Monget, J. M., Albuissou, M., Guillard, H. y otros, 1986. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy* 37, 31-39.
- Cross, S., Albuissou, M., Lefèvre, M., Rigollier, C. y Wald, L., 2004. HelioClim: a long-term database on solar radiation for Europe and Africa. Ponencias de: The 2004 Eurosun Congress, Freiburg (Germany). pp. 916-920.
- de Miguel, A., Bilbao, J., Aguiar, R., Kambezidis, H. y otros, 2001. Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt area. *Solar Energy* 70, 143-153.
- Diabaté, L., Demarcq, H., Michaud-Regas, N. y 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., Moussu, G. y Wald, L., 1989. Description of an operational tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images. *Solar Energy* 42, 201-207.
- Erbs, D. G., Klein, S. A. y Duffie, J. A., 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy* 28, 293-302.

- Espinar, B., Ramírez, L., Drews, A., Beyer, H. G. y otros, 2009. Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and German radiometric stations. *Solar Energy* 83, 118-125.
- EUMETSAT, 2000. The Meteosat archive. Format guide #1. Basic Imagery - OpenMTP Format. EUMETSAT, Darmstadt (Germany).
- EUMETSAT, 2002. Meteosat High resolution image dissemination. Technical description. EUMETSAT, Darmstadt (Germany).
- Fröhlich, C. y Brusa, R. W., 1981. Solar radiation and its variation in time. *Sol. Phys.* 74, 209-215.
- Fröhlich, C., 2002. Total solar irradiance variations since 1978. *Advances in Space Research* 29, 1409-1416.
- Gautier, C., Diak, G. y Masse, S., 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology* 19, 1005-1012.
- Geiger, M., Diabaté, L., Menard, L. y Wald, L., 2002. A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. *Solar Energy* 73, 475-480.
- Girodo, M., Mueller, R. W. y Heinemann, D., 2006. Influence of three-dimensional cloud effects on satellite derived solar irradiance estimation--First approaches to improve the Heliosat method. *Solar Energy* 80, 1145-1159.
- Gueymard C.A. y Myers D.R., 2008. Solar Radiation Measurement: Progress in Radiometry for Improved Modeling, pp. 1-27. Contenido en: *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*. Editado por: Viorel Badescu. Springer-Verlag,
- Gueymard, C., 1998. Turbidity determination from broadband irradiance measurements: a detailed multicoefficient approach. *Journal of Applied Meteorology* 37, 414-435.
- Gueymard, C. A., 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* 43, 253-265.
- Gueymard, C. A., 2003a. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 379.
- Gueymard, C. A., 2003b. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high-quality measurements. *Solar Energy* 74, 395.

Gueymard, C. A., 2005. Importance of atmospheric turbidity and associated uncertainties in solar radiation and luminous efficacy modelling. *Energy* 30, 1603-1621.

Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R. y otros, 2003. Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sensing of Environment* 86, 423-432.

Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D. y otros, 1998. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment* 66, 1-16.

Hoyer-Klick, K., Beyer, H. G., Dumortier, D., Schroedter, M., Wald, L., Martinoli, M., Schilings, C., Gschwind, B., Menard, L., Gaboardi, E., Ramírez, L., Polo, J., Cebecauer, T., Huld, T., Suri, M., de Blas, M., Lorenz, E., Pfatischer, R., Remund, J., Ineichen, P., Tsvetkov, A. y Hofierka, J., 2008. Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge. Ponencias de: pp. 569-570.

Ineichen, P., 2005. Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Solar Energy* In Press.

Ineichen, P., 2008a. A broadband simplified version of the Solis clear sky model. *Solar Energy* 82, 758-762.

Ineichen, P. y Perez, R., 2002. A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy* 73, 151-157.

Ineichen, P. y Perez, R., 1999. Derivation of cloud index from geostationary satellites and application to the production of solar irradiance and daylight illuminance data. *Theoretical and Applied Climatology* 64, 119-130.

Ineichen, P., 2008b. Comparison and validation of three global-to-beam irradiance models against ground measurements. *Solar Energy* 82, 501-512.

Ineichen, P., 2008c. Conversion function between the Linke turbidity and the atmospheric water vapor and aerosol content. *Solar Energy* 82, 1095-1097.

Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.

Kasten, F., 1996. The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy* 56, 239-244.

Linke, F., 1922. Transmissions-Koeffizient und Trübungsfaktor. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre* 10, 91-103.

Liou, K. N., 2002. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press.

- Long, C. y Ackerman, T., 2000. Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects. *Journal of Geophysical Research* 105, 15,609-15,626.
- Louche, A., Notton, G., Poggi, P. y Simonnot, G., 1991. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. *Solar Energy* 46, 261-266.
- Louche, A., Peri, G. y Iqbal, M., 1986. An analysis of the Linke turbidity factor. *Solar Energy* 37, 393-396.
- Martins, F. R., Pereira, E. B. y Abreu, S. L., 2007. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. *Solar Energy* 81, 517-528.
- Massey F.J.Jr., 1951. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association* 56, 68-78.
- Maxwell, A. L., 1987. A quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation. Technical Report No. SERI/TR-215-3087.
- McArthur, L. J. B., 1998. Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Operations manual V1.0. Serie: World Climate Research Programme. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva (Switzerland).
- Mueller, R. W., Dagestad, K. F., Ineichen, P., Schroedter-Homscheidt, M. y otros, 2004c. Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment* 91, 160-174.
- Mueller, R. W., Dagestad, K. F., Ineichen, P., Schroedter-Homscheidt, M. y otros, 2004b. Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment* 91, 160-174.
- Mueller, R. W., Dagestad, K. F., Ineichen, P., Schroedter-Homscheidt, M. y otros, 2004a. Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment* 91, 160-174.
- Muneer, T., Gueymard, C. A. y Kambezidis, H., 2004. *Solar Radiation and Daylight Models*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Noia, M., Ratto, C. F. y Festa, R., 1993b. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical models. *Solar Energy* 51, 457-465.
- Noia, M., Ratto, C. F. y Festa, R., 1993a. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models. *Solar Energy* 51, 449-456.

Orgill, J. F. y Hollands, K. G. T., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy* 19, 357-359.

Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Couto, P. y otros, 2000. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. *Solar Energy* 68, 91-107.

Perez, R., Kmiecik, M., Moore, K., Wilcox, S., George, R., Renne, D., Vignola, F. y Ineichen, P., 2004. Status of high resolution solar irradiance mapping from satellite data. Ponencias de: National Solar Energy Conference 2004, Portland (USA).

Perez, R., Seals, R., Zelenka, A. y Ineichen, P., 1990. Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance: prospects for performance improvements. *Solar Energy* 44, 99-108.

Petrucci, J. D., Nandram, B. y Chen, M., 1999. *Applied Statistics for Engineers and Scientists*. Prentice Hall, Upper Saddle River (USA).

Pinker, R. T., Frouin, R. y Li, Z., 1995. A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance. *Remote Sensing of Environment* 51, 108-124.

Pinker, R. T. y Laszlo, I., 1991. Effects of spatial sampling of satellite data on derived surface solar irradiance. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 8, 96-107.

Polo, J., Zarzalejo, L. F., Martín, L., Navarro, A. A. y otros, 2009a. Estimation of daily Linke turbidity factor by using global irradiance measurements at solar noon. *Solar Energy* In Press, Corrected Proof.

Polo, J., Zarzalejo, L. F. y Ramírez, L., 2008. Solar Radiation Derived from Satellite Images, pp. 449-460. Contenido en: *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*. Editado por: Viorel Badescu. Springer-Verlag,

Polo, J., Zarzalejo, L. F., Ramírez, L. y Espinar, B., 2006. Iterative filtering of ground data for qualifying statistical models for solar irradiance estimation from satellite data. *Solar Energy* 80, 240-247.

Polo, J., Zarzalejo, L. F., Salvador, P. y Ramírez, L., 2009b. Angstrom turbidity and ozone column estimations from spectral solar irradiance in a semi-desertic environment in Spain. *Solar Energy* 83, 257-263.

Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. y Vetterling, W. T., 1988. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press.

Reindl, D. T., Beckman, W. A. y Duffie, J. A., 1990. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* 45, 1-7.

- Remund, J., Albuisson, M., Lefèvre, M. y Wald, L., 2003. Worldwide Linke turbidity information. Ponencias de: ISES Solar World Congress, 16-19 June, Götteborg, Sweden,
- Remund, J. y Page, J., 2003. Chain of algorithms to calculate advanced radiation parameters. Ponencias de: ISES Solar World Congress, 16-19 June, Göteborg, Sweden,
- Rigollier, C., Bauer, O. y Wald, L., 2000. On the clear sky model of the ESRA -- European Solar Radiation Atlas -- with respect to the heliosat method. *Solar Energy* 68, 33-48.
- Rigollier, C., Lefèvre, M. y Wald, L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy* 77, 159-169.
- Schillings, C., Mannstein, H. y Meyer, R., 2004. Operational method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data. *Solar Energy* 76, 475-484.
- Tarpley, J. D., 1979. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *Journal of Applied Meteorology* 18, 1172-1183.
- Taylor, V. R. y Stowe, L. L., 1984. Reflectance characteristics of uniform earth and cloud surfaces derived from NIMBUS-7 ERB. *Journal of Geophysical Research* 89, 4987-4996.
- Tovar, J., 2008. Modelling the statistical properties of solar radiation and proposal of a technique based on Boltzmann Statistics, pp. 55-91. Contenido en: *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*. Editado por: Viorel Badescu. Springer-Verlag,
- Tovar, J., Olmo, F. J. y Alados-Arboledas, L., 1998. One-minute global irradiance probability density distributions conditioned to the optical air mass. *Solar Energy* 62, 387-393.
- Tovar, J., Olmo, F. J., Batlles, F. J. y Alados-Arboledas, L., 2001. Dependence of one-minute global irradiance probability density distributions on hourly irradiation. *Energy* 26, 659-668.
- WMO, 1981. Annex: World maps of relative global radiation. Technical note N° 172, pp. 25-27. Contenido en: *Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source*. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva (Switzerland).
- Yang, K., Huang, G. W. y Tamai, N., 2001. A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy* 70, 13-22.
- Zarzalejo, L. F., Ramírez, L., Polo, J., Martín, L. y otros, 2006a. Estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite: nuevos mapas de evaluación de la irradiancia solar para la península Ibérica. *Averma* 10, 11.71-11.78.

Zarzalejo, L. F., Ramírez, L., Polo, J., Martín, L. y Espinar, B., 2006b. Irradiancia solar a partir de imágenes de satélite. Hacia un nuevo Atlas Ibérico de radiación solar. Ponencias de: XIII Congreso Ibérico e VIII Ibero-Americano de Energía Solar, Lisboa (Portugal).

Zarzalejo, L. F., Polo, J., Martín, L., Ramírez, L. y otros, 2009a. A new statistical approach for deriving global solar radiation from satellite images. *Solar Energy* 83, 480-484.

Zarzalejo, L. F., Polo, J., Martín, L., Ramírez, L. y otros, 2009b. A new statistical approach for deriving global solar radiation from satellite images. *Solar Energy* 83, 480-484.

Zarzalejo, L. F., Ramírez, L. y Polo, J., 2005. Artificial intelligence techniques applied to hourly global irradiance estimation from satellite-derived cloud index. *Energy* 30, 1685-1697.

Zarzalejo, L. F., 2005. Estimación de la irradiancia global horaria a partir de imágenes de satélite. Desarrollo de modelos empíricos. Tesis Doctoral en el programa: Física Atómica y Nuclear y Energías Renovables, Universidad Complutense de Madrid (España).

Zelenka, A., Perez, R., Seals, R. y Renne, D., 1999. Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology* 62, 199-207.

