Tethys
Revista de meteorología
y climatología mediterránea

Tethys 2011, **8**, 45–54
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2011.8.05
Revista editada por **ACAM**

Comparación de medidas de irradiancia global de la red radiométrica oficial española para 2006 con valores estimados por satélite

J. M. Sancho, M. C. Sánchez de Cos y C. Jiménez

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Delegación Territorial en Andalucía, Ceuta y Melilla, Centro Meteorológico de Málaga; C/ Demóstenes, 4, 29010 Málaga

Recibido: 15-III-2010 – Aceptado: 14-II-2011 – **Versión original**

Correspondencia a: jsanchoa@aemet.es

Resumen

Se ha realizado la comparación de los valores promedios mensuales de irradiancia global diaria medidos en 40 estaciones de la Red Radiométrica Nacional en banda ancha de la Agencia Estatal de Meteorología con los valores mensuales de Surface Incoming Shortwave radiation (SIS) del Climate Monitoring-Satellite Application Facility para el año 2006. Se calcula a partir de los datos del instrumento Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager del satélite Meteosat Segunda Generación y del Advanced Very High Resolution Radiometer de los satélites polares de la NOAA. Los resultados muestran una gran similitud de los datos procedentes de ambas fuentes de información, siendo las discrepancias encontradas en torno al 5%. El objeto de esta comparación es evaluar la conveniencia del uso de los datos de SIS para la elaboración de un atlas de irradiancia solar disponible en España.

Palabras clave: irradiancia global, AEMET, SIS del CM-SAF, EUMETSAT, comparación

1 Introducción

Los estudios dirigidos a la caracterización y comprensión del clima de la Tierra requieren la medida precisa de distintas variables climáticas con una cobertura global, con una alta resolución espacial y un período de tiempo suficientemente largo. Estas condiciones sólo se pueden conseguir con el uso de datos basados en medidas desde el espacio obtenidas mediante satélites meteorológicos en órbitas geoestacionarias y polares. Estos datos son los únicos disponibles con suficiente resolución en los océanos y regiones poco pobladas y actualmente las series de datos procedentes de dichos satélites comienzan a tener una cobertura temporal aceptable con medidas disponibles desde comienzos de la década de los 80 hasta el presente. Por lo tanto estas series de datos satelitales se pueden considerar actualmente susceptibles de ser utilizadas para la elaboración de análisis climáticos. Las exigencias de precisión en las medidas se incrementan a medida que aumenta la escala de tiempo considerada, de manera que los estudios de caracterización climática a escala decenal requieren datos con una resolución un orden de magnitud superior a la precisión requerida para estudios de fluctuaciones interanuales (Schulz et al., 2009).

El único método objetivo de evaluar de forma cuantitativa la precisión de los algoritmos que se aplican a los datos brutos satelitales para el cálculo de los datos derivados de irradiancia incidente de onda corta en superficie es mediante estudios de validación de dichos datos calculados de irradiancia con medidas de irradiancia in-situ obtenidas en estaciones radiométricas en tierra. El *Surface Incoming Shortwave Radiation* (SIS) es la irradiancia solar en la banda 0,2-4,0 μm sobre superficie horizontal, a nivel del suelo. En este trabajo se ha llevado a cabo la validación de datos para el año 2006 del producto SIS procedentes del *Satellite Application Facility on Climate Monitoring* (CM-SAF) de EUMETSAT con medidas de 40 estaciones de la Red Radiométrica Nacional (RRN) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

El CM-SAF realiza validaciones periódicas anuales para el seguimiento de la precisión y calidad de los productos producidos. La variabilidad natural de los productos sobre la región cubierta por el CM-SAF no está en general bien representada en la comparación con los datos de estaciones en tierra. En particular, existe una notoria es-

(cc) BY *2011 Autor(es). Este trabajo tiene licencia "Creative Commons".*

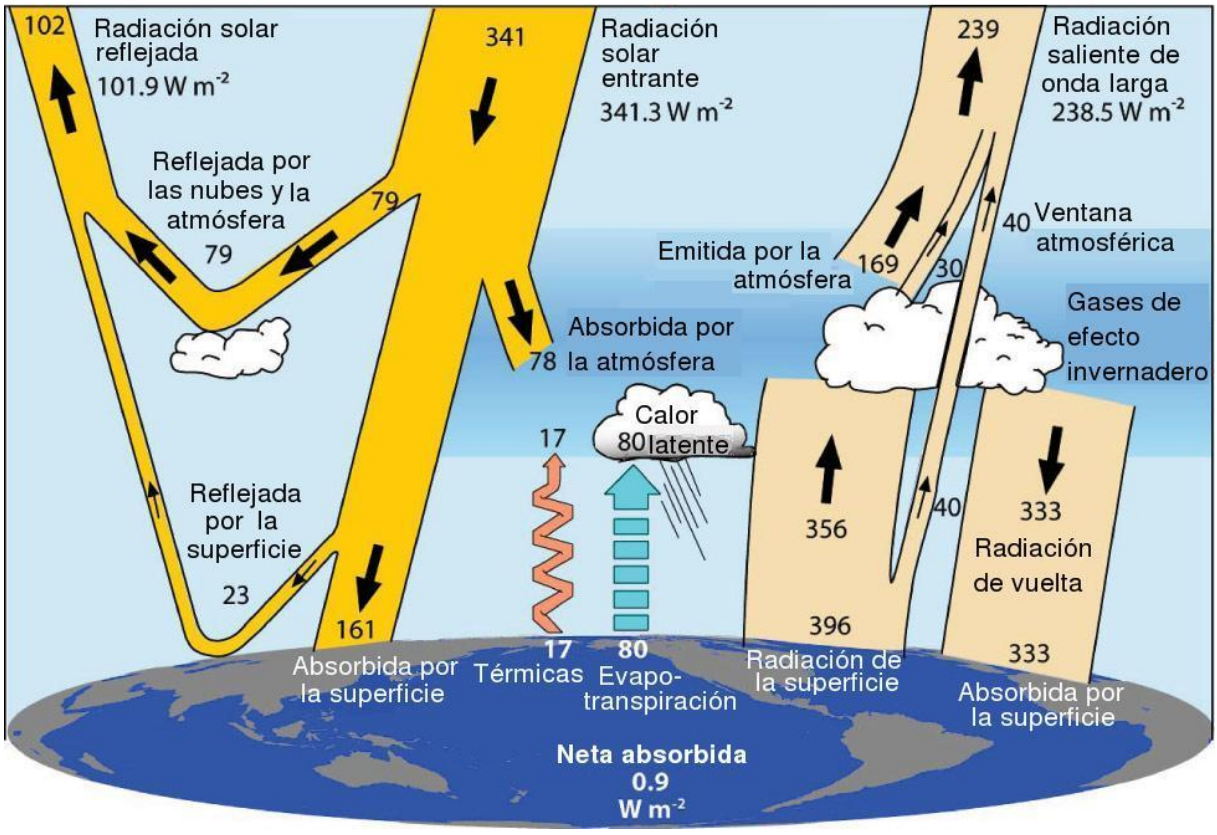

Figura 1. Balance radiativo medio del sistema Tierra-Atmośfera. Muestra la irradiancia de onda corta a la izquierda y la irradiancia de onda larga saliente a la derecha (Trenberth et al., 2009).

casez de estaciones radiométricas de referencia en superficie que lleven a cabo medidas de flujos radiativos que puedan ser utilizadas para realizar comparaciones y validaciones con los productos operativos del CM-SAF. Por ejemplo, en 2009, se utilizaron únicamente datos de 4 estaciones europeas de la red BSRN (*Baseline Surface Radiation Measurement*) en tiempo casi real para el control anual de la estabilidad y homogeneidad de los productos radiativos. Estas estaciones están situadas en Payerne (46,81°N, 6,94°E), Carpentras (44,05°N, 5,03°E), Lindenberg (52,22°N, 14,12°E) y Cabauw (51,97°N, 4,91°E). Los últimos resultados muestran que más del 90% de las diferencias de los valores de SIS con respecto a los valores medios mensuales medidos en las estaciones en tierra son inferiores a 10 W m^{-2}, que es el límite superior de incertidumbre definido como objetivo por el CM-SAF (CM-SAF, 2010).

El valor añadido de este estudio con respecto a las validaciones existentes referenciadas a las estaciones de la red BSRN reside en que las comparaciones de valores de SIS se han realizado con estaciones de la RRN de AEMET, con una densidad de emplazamientos mucho mayor que la de la red de referencia BSRN. Por otro lado, las estaciones radiométricas de AEMET siguen un riguroso protocolo de calibraciones y actuaciones periódicas de mantenimiento que describiremos en detalle en la Sección 2.

Los resultados de este trabajo muestran unos resultados similares a las validaciones periódicas realizadas por el CM-SAF utilizando estaciones de la red de referencia mundial BSRN, mostrando una calidad aceptable del producto SIS con desviaciones del orden del 5% con respecto a las medidas en tierra cumpliendo los requerimientos de precisión propuestos por el CM-SAF y considerados exigibles para la elaboración de análisis climáticos (Mueller et al., 2009).

Por lo tanto, estos resultados avalan la conveniencia de la utilización de la variable SIS del CM-SAF para la elaboración de campos medios de irradiancia incidente de onda corta en España, así como detección de posibles tendencias, cálculo de promedios mensuales y estacionales y otros estudios relacionados con la variabilidad natural o de carácter antrópico de los flujos radiativos en superficie.

A continuación se exponen algunos conceptos e ideas básicas acerca del balance radiativo tierra-atmósfera y se pueden ver en la Figura 1. La irradiancia global de onda corta 0,2-4,0 μm es la energía solar que alcanza la superficie terrestre después de todos los procesos de absorción y dispersión que se producen a lo largo del camino a través

Figura 2. Red Radiométrica Nacional de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

de la atmósfera. En el techo de la atmósfera, la irradiancia de onda corta es en promedio de 341 W m^{-2}. La absorción de irradiancia de onda corta debido a las moléculas, los aerosoles y las nubes supone aproximadamente un 23% (78 W m^{-2}) de la energía incidente y contribuye al calentamiento de la atmósfera. Los procesos de retrodispersión y reflexión hacia el espacio debido a las nubes suponen un 23% (79 W m^{-2}). Por tanto, un 54% (184 W m^{-2}) de la irradiancia llega a la superficie de la Tierra donde, dependiendo de las características reflectantes de la superficie, aproximadamente el 7% (23 W m^{-2}) de la energía incidente es reflejada. Así pues, el albedo medio resultante del sistema Tierra-Atmósfera, sumando los procesos de retrodispersión, reflexión por las nubes y reflexión en la superficie terrestre es del 23% + 7% = 30% (102 W m^{-2}).

Del 54% (184 W m^{-2}) de la irradiancia de onda corta que llega a la superficie de la Tierra, en promedio, un 30% (55 W m^{-2}) lo hace como irradiancia directa, y un 27% (49 W m^{-2}) como irradiancia difusa.

2 Red radiométrica nacional en banda ancha

La RRN depende del Centro Radiométrico Nacional (CRN) que a su vez está adscrito a la AEMET. La RRN consta actualmente de 51 estaciones radiométricas. En la Figura 2 se muestran las estaciones radiométricas que constituyen la RRN indicándose las variables de medida que se obtienen en cada una de ellas. Para este trabajo se han seleccionado 40 estaciones radiométricas (ver Tabla 1), con datos mensuales de irradiancia global y difusa durante el año 2006 con el fin de llevar a cabo un estudio comparativo de estas medidas con las obtenidas por el radiómetro SEVIRI del satélite Meteosat Segunda Generación (MSG) y *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) de los satélites de la NOAA.

En las estaciones radiométricas principales de la RRN se llevan a cabo las medidas de las siguientes variables: irradiancia global, difusa y directa, irradiancia infrarroja y ultravioleta B (UVB). Los sensores de irradiancia directa, global, difusa e infrarroja están montados sobre un seguidor solar automático como se muestra en la Figura 3, que consta de unidades de sombreado, consistentes en bolas sujetas con varillas que proyectan su sombra sobre un piranómetro para la obtención de la irradiancia difusa. Dichos sensores son los piranómetros de medida de irradiancia global y difusa, el pirgeómetro para la medida de la irradiancia infrarroja y el pirheliómetro de irradiancia directa.

Tabla 1. Estaciones Radiométricas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) utilizadas en el estudio.

Indicativao	Nombre	Longitud	Latitud
B278	Palma (Aep. Son Sant Joan)	2° 44' 38"E	39° 34' 00"
24B954	Sant Josep (Aep. Eivissa)	1° 22' 12"E	38° 52' 41"
0201D	Barcelona (CMT)	2° 12' 05"E	41° 23' 27"
0016A	Aep. Reus	1° 10' 44"E	41° 08' 59"
1428	Santiago	8° 25' 37"W	42° 53' 58"
367	Aep. de Girona	2° 45' 37"E	41° 54' 05"
1479I	Corón	8° 48' 13"W	42° 34' 52"
1014	Aep. de Fuenterrabia	1° 47' 25"W	43° 21' 24"
1024E	San Sebastián	2° 02' 22"W	43° 18' 27"
1082	Aep. de Bilbao	2° 54' 21"W	43° 17' 53"
1111	Santander (CMT)	3° 47' 59"W	43° 29' 30"
1249I	Oviedo	5° 52' 24"W	43° 21' 13"
1387	A Coruña	8° 25' 10"W	43° 22' 02"
2030	Soria	2° 28' 00"W	41° 46' 00"
2422	Valladolid	4° 46' 00"W	41° 39' 00"
2867	Salamanca	5° 29' 46"W	40° 56' 44"
3194U	Madrid C. Universitaria	3° 43' 27"W	40° 27' 10"
3469A	Cáceres	6° 20' 22"W	39° 28' 20"
4121	Ciudad Real	3° 55' 11"W	38° 59' 22"
4478G	Badajoz	7° 00' 42"W	38° 53' 10"
1495	Vigo	8° 37' 55"W	42° 13' 25"
5530E	Aep. de Granada	3° 46' 35"W	37° 11' 24"
5960	Aep. de Jerez de la Frontera	6° 03' 48"W	36° 44' 45"
5973	Cádiz	6° 15' 37"W	36° 29' 55"
4642E	Huelva	6° 54' 35"W	37° 16' 48"
6156	Málaga (CMT)	4° 28' 49"W	36° 43' 09"
6325O	Aep. de Almería	2° 23' 17"W	36° 50' 35"
7178I	Murcia	1° 10' 10"W	38° 00' 10"
7031	S. Javier	0° 48' 08"W	37° 47' 12"
8019	Aep. de Alacant	0° 33' 20"W	38° 17' 09"
8414A	Aep. de València	0° 28' 16"W	39° 29' 22"
9091O	Aep. de Vitoria	2° 43' 22"W	42° 53' 02"
9170	Logroño	2° 19' 51"W	42° 27' 06"
9771C	Lleida	0° 35' 42"E	41° 37' 33"
2661	León	5° 38' 58"W	42° 35' 20"
3260B	Toledo	4° 02' 58"W	39° 53' 05"
8178D	Albacete	1° 51' 39"W	39° 00' 25"
9263D	Pamplona	1° 38' 21"W	42° 46' 06"
9433	Zaragoza	1° 04' 18"W	41° 40' 44"
9981A	Tortosa	0° 29' 29"E	40° 49' 14"

Estos equipos están conectados a un sistema de adquisición que almacena los datos cada minuto, que a su vez son transmitidos en tiempo real mediante la red interna de AEMET al CRN.

Hay tambien estaciones secundarias con medidas de irradiancia global, difusa y en algunos casos UVB.

A lo largo del año 2005 se llevó a cabo un proceso de modernización completa de la RRN que supuso la adquisición de nuevos sensores y equipos y su instalación en los distintos emplazamientos de la red.

El programa de calibraciones consiste en un plan bianual en el que todos los sensores de visible (piranómetros y pirheliómetros) e infrarrojo (pirgeómetros) de la red son comparados con sensores patrón que previamente son calibrados también bianualmente en el *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium* en Davos, declarado desde 1971 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, Centro Mundial de Datos de Radiación en San Petersburgo), Centro Mundial de Radiación (*World Radiation Center*, WRC) (http://www.pmodwrc.ch/).

Las calibraciones de los sensores patrón en el WRC de Davos se realizan utilizando un instrumento patrón primario mundial de radiación (modelo PMO2). Asimismo, y con el fin de detectar posibles derivas instrumentales, se lleva a cabo un control periódico adicional de los sensores patrón utilizando un patrón

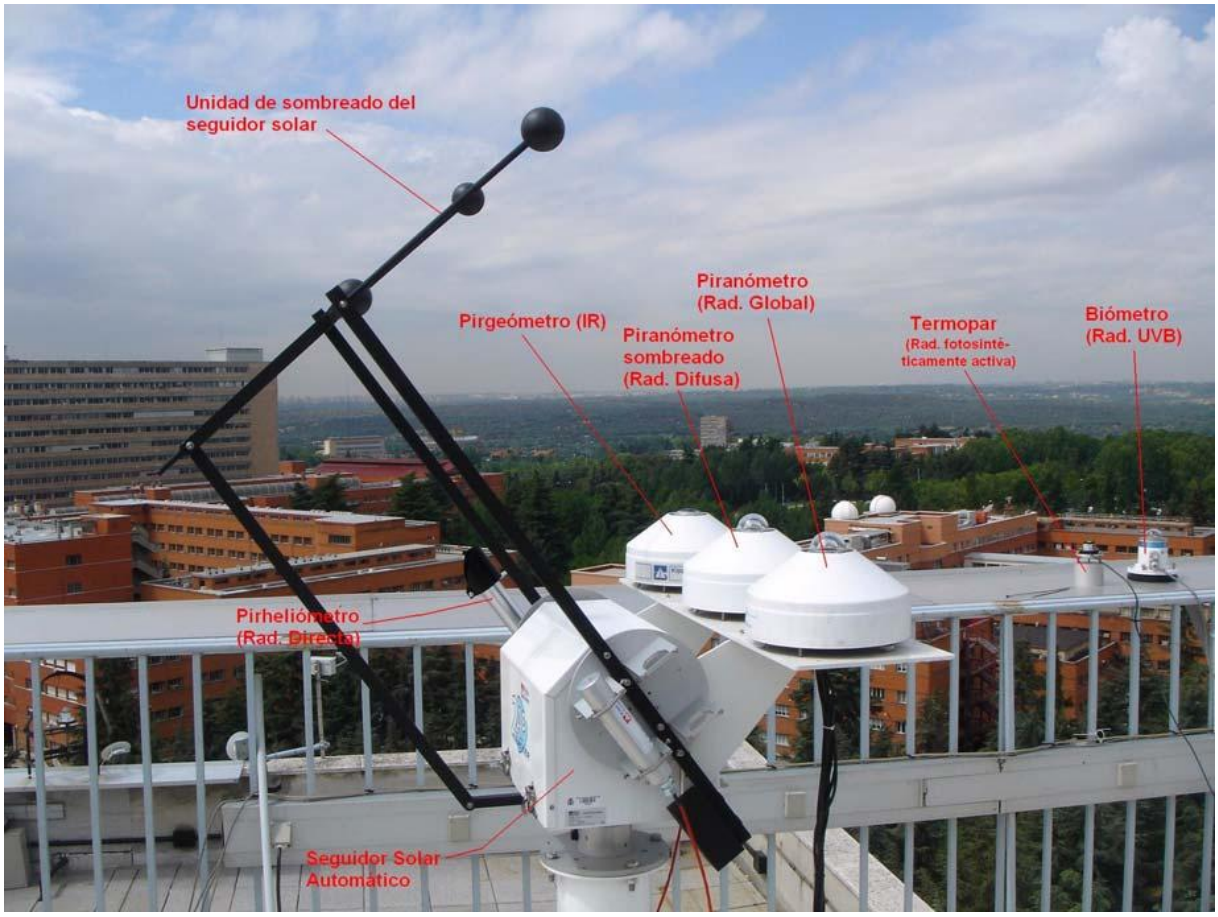

Figura 3. Instrumentos y sensores de una estación radiométrica completa de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

secundario (modelo PMO6) disponible para tal fin en el CRN.

El procedimiento de calibración de los piranómetros de la red se realiza por comparación directa con los sensores patrón mediante medidas en el exterior utilizando el Sol como fuente de radiación durante varios días. El proceso de calibración conduce a la modificación, en su caso, de la constante del equipo o factor de calibración, es decir el factor de conversión de la señal en milivoltios a valores de irradiancia en W m^{-2}.

Aparte del proceso de calibración descrito anteriormente, los datos son diariamente revisados visualmente y corregidos de posibles errores instrumentales o del sistema de adquisición mediante un software específico con filtros definidos adecuadamente. Por otro lado, la instrumentación es revisada semanalmente siguiendo una completa rutina de mantenimiento única para toda la red que incluye la limpieza de los domos de los piranómetros, la revisión de los sistemas de ventilación y del sistema de adquisición de datos, entre otras tareas de mantenimiento. Los datos calibrados y depurados son finalmente enviados a las bases de datos de AEMET y de la OMM.

La irradiancia global se define como la irradiancia solar recibida de un ángulo sólido de 2π estereorradianes sobre una superficie horizontal. La irradiancia global incluye la recibida directamente del disco solar y la irradiancia difusa dispersada por la atmósfera.

Las estaciones radiométricas están equipadas para las medidas de irradiancia global y difusa con piranómetros Kipp-Zonen modelos CM-11 y CM-21, con un rango espectral de 305-2800 nm y con una incertidumbre de $\pm$ 2%. En la Tabla 2 se muestra información relativa a las especificaciones técnicas de los piranómetros CM-11 y CM-21.

3 Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF)

En Noviembre de 1992, EUMETSAT creó la red de centros especializados SAF (*Satellite Application Facilities*), con el fin de obtener un mejor aprovechamiento de los datos procedentes de los satélites meteorológicos, mediante el desarrollo de algoritmos y software para la obtención de productos meteorológicos derivados que complementen los producidos y distribuidos por la central de EUMETSAT en

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los piranómetros Kipp-Zonen modelos CM11 y CM21 instalados en las estaciones radiométricas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

	CM-11	CM-21
Rango espectral	305-2800 nm	305-2800 nm
Tiempo de respuesta (95%)	12 s	5 s
Inestabilidad (cambio/año)	± 0,50%	± 0,50%
Desviaciones de linealidad (0-1000 W m^{-2})	± 0,60%	± 0,20%
Dependencia de la sensibilidad con la temperatura	± 1%	± 1%
Precisión estimada para medidas diarias	± 3%	± 2%

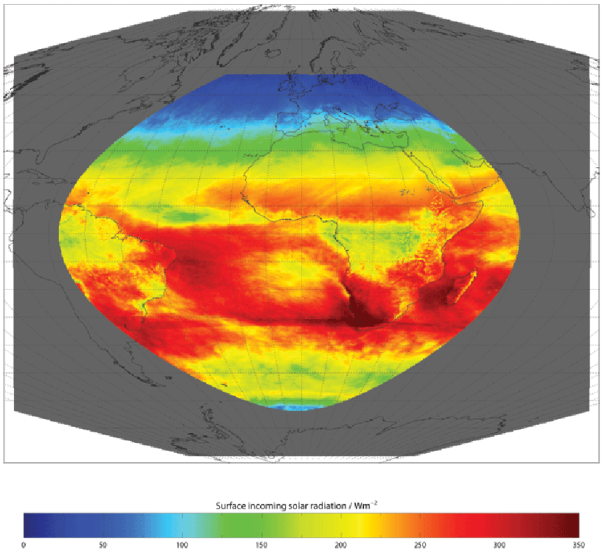

Figura 4. Ejemplo de producto SIS (*Surface Incoming Shortwave Radiation*) del *Satellite Application Facilities* de Clima para el día 01/11/2006 a las 00:00 UTC.

Darmstad. Cada uno de los centros SAF está especializado en un tipo de productos y liderado por un Servicio Meteorológico Nacional. Actualmente existen 7 proyectos SAF aprobados y en operación:

- SAF para el apoyo al *Nowcasting* y la Predicción a muy corto plazo.
- SAF para los Océanos y los Hielos Marinos.
- SAF para el Control del Clima.
- SAF para la Predicción Numérica del Tiempo.
- SAF para el Análisis Superficial de Tierra.
- SAF para el Ozono y Control de la Química Atmosférica.
- SAF para la Meteorología GRAS.

En este trabajo se han utilizado datos del CM-SAF, liderado por el Servicio Meteorológico Alemán (*Deutscher Wetterdienst*, DWD).

El CM-SAF fue creado con el fin de generar y archivar de forma continua una serie de datos climatológicos con el objetivo de caracterizar el estado del clima y su variabilidad y analizar y diagnosticar parámetros climáticos para identificar y entender cambios en el sistema climático. Por otro lado, se creó con el propósito de proporcionar datos de entrada para modelos climáticos con el fin de estudiar distintos procesos del sistema climático a escala europea y global y para la predicción climática.

El CM-SAF proporciona datos climatológicos para algunas de las 44 variables climáticas definidas como Variables Climáticas Esenciales (*Essential Climate Variables*) por el Sistema de Observación Climática Global (*Global Climate Observing System*) en el marco de *United Nations Framework Convention on Climate Change*). En concreto las variables que proporciona el CM-SAF incluye parámetros nubosos, albedo superficial, flujos radiativos en superficie y en el techo de la atmósfera, temperatura y humedad atmosférica (Schulz et al., 2009). Existen dos categorías de datos disponibles que son denominados productos y datasets. Los productos son datos validados utilizando estaciones en tierra y son proporcionados en tiempo casi real, con precisión suficiente para la realización de estudios de variabilidad en escalas temporales diurnas y estacionales. Para estudios en los que se requieren evaluaciones de tendencias y estudios de variabilidad interanual es necesario utilizar la categoría de datos denominada dataset. Los datasets son datos corregidos debidos a cambios instrumentales en sucesivos satélites y otros efectos más sutiles como derivas en las respuestas espectrales de los instrumentos o pequeñas variaciones en las medidas debido a ligeros cambios en la órbita de los satélites.

Para este trabajo se han utilizado datos del producto SIS del SAF-Climate cuyo cálculo está basado en el método de Pinker y Laszlo (1992) y Mueller et al. (2004). El principio de conservación de la energía en una columna atmosférica nos permite estimar la transmisividad atmosférica en banda ancha a partir de la reflectividad en el techo de la atmósfera. Para la obtención de la reflectividad en el techo de la atmósfera se utilizan medidas del instrumento *Geostationary Earth Radiation Budget* en el MSG. El SIS es el flujo de irradiancia de onda corta que incide en la superficie horizontal en la banda 0,2-4,0μm, expresado en W m^{-2}. Para este estudio se han utilizado valores de SIS promediados mensualmente para el año 2006 con una resolución espacial de 15 km.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de valores medios mensuales de SIS.

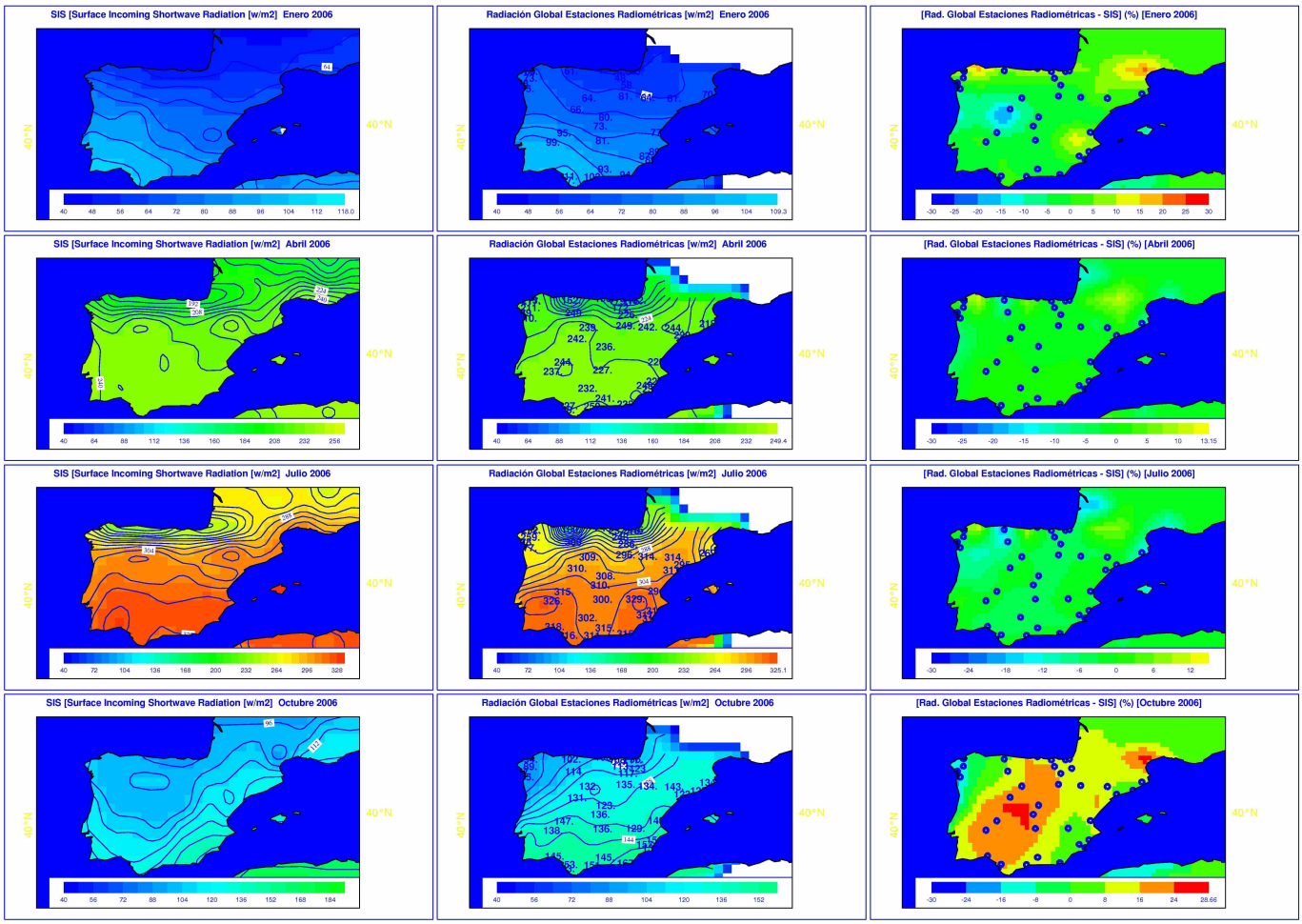

Figura 5. Comparación de promedios mensuales diarios de valores de *Surface Incoming Shortwave Radiation* (SIS) con los promedios mensuales diarios de irradiancia global de la Red Radiométrica Nacional para los meses de enero, abril, julio y octubre de 2006. Primera columna: valores de SIS; segunda columna: medidas de la Red Radiométrica; tercera columna: diferencia porcentual.

La idea básica del algoritmo de obtención de SIS es que existe una relación en la banda 0,2-4,0 μm entre la reflectividad (R) en el techo de la atmósfera, que se puede obtener directamente de las medidas registradas por los satélites, y la transmisividad atmosférica (T) o ratio entre la irradiancia en la superficie y la correspondiente en el techo de la atmósfera. Una vez conocida esta relación, es posible calcular T y la irradiancia en superficie, es decir el SIS. Por tanto, existen relaciones del tipo:

$$T = f_i(R) \qquad (1)$$

donde R es la reflectividad en el techo de la atmósfera, T es la transmisividad atmosférica e $i = 1,..., N$ representa a cada una de las diferentes condiciones superficie-atmósfera caracterizadas por los siguientes parámetros: albedo superficial, cantidad de gases absorbentes en la atmósfera (ozono, vapor de agua) y partículas difusoras (moléculas, aerosoles, gotas nubosas). Estas relaciones entre T y R se calculan previamente mediante un modelo de transferencia radiativa (Mayer y Kylling, 2005) y se obtienen previamente unas tablas (LUT, *Look-Up Tables*) que se utilizan posteriormente para el cálculo de T en función de R para cada una de las condiciones de observación. La razón del uso de tablas calculadas previamente para el cálculo de la transmisividad atmosférica en lugar de realizar los cálculos directamente mediante el modelo de transferencia radiativa es exclusivamente para ahorrar tiempo computacional, ya que es enorme la cantidad de datos satelitales para producir series homogéneas de datos de alta calidad útiles para la realización de estudios climáticos. La aplicación del algoritmo de obtención del SIS tiene en cuenta distintos parámetros nubosos precalculados como la máscara de nube, presión en el tope de las nubes y tipo de nubes, utilizándose dos esquemas diferentes para el cálculo de la irradiancia en superficie según los píxeles sean con cielo despejado o con cielo nuboso (Mueller et al., 2009).

El siguiente paso es la obtención de R a partir de las medidas de albedo en el techo de la atmósfera obtenida por los radiómetros de los satélites, en el caso de píxeles

nubosos. En el caso de cielo despejado sólo se utiliza el albedo en superficie con el fin de minimizar el efecto de las incertidumbres en el albedo en superficie (Mueller et al., 2004).

Finalmente se utilizan las tablas obtenidas previamente para las condiciones atmósfera- superficie que prevalecen en el momento de la medida para obtener T y con este valor se realiza la estimación del SIS mediante la expresión:

$$SIS = E_0 \cos(\Theta) T \quad (2)$$

donde E_0 es la irradiancia solar en la cima de la atmósfera (Constante Solar), Θ es el ángulo zenital y T la transmisividad atmosférica.

Para el cálculo de las tablas, el modelo de trasferencia radiativa utilizado es el libRadtran (Mayer y Kylling, 2005). Se han tenido en cuenta simetrías inherentes en la relación entre los diferentes estados atmosféricos y la transmisividad con el fin de identificar una serie de procesos linealmente independientes entre ellos y por lo tanto reducir el número de entradas en las tablas con el consiguiente ahorro adicional en tiempo de cálculo. Los procesos que pueden considerarse como linealmente dependientes se han tratado utilizando parametrizaciones para estimar su influencia en la transmisividad y por lo tanto en la irradiancia en superficie. Este es el caso del vapor de agua y del ozono, para los que se han definido valores fijos en las tablas y posteriormente se han utilizado fórmulas de parametrización para tener en cuenta la influencia de sus variaciones en los valores de SIS (Schulz et al., 2009) y (Mueller et al., 2009).

Las LUT para la obtención del producto SIS se han calculado para 3 profundidades ópticas de nube diferentes, 10 profundidades ópticas de aerosoles, 6 ángulos zenitales, y 7 albedos superficiales. Cabe destacar que, por el momento, sólo se han tenido en cuenta nubes acuosas a altitudes fijas y con distintos espesores, pero no se incluyeron en los cálculos las diferentes propiedades ópticas de nubes con partículas de hielo. Esto debe tenerse en cuenta al analizar las posibles fuentes de error en la estimación del SIS.

4 Comparación de medidas de las estaciones radiométricas con las medidas del SIS del CM-SAF

Con el fin de evaluar la exactitud del algoritmo de obtención del SIS del CM-SAF y la conveniencia del uso de estos datos como complemento a los procedentes de la RRN, se ha realizado una comparación de los promedios mensuales diarios del SIS con las medidas correspondientes de irradiancia global para todas las estaciones indicadas en la Tabla 1 para todo el año 2006.

En la Figura 5 se muestran los promedios mensuales diarios del SIS en la primera columna, los datos correspondientes de irradiancia global medidos en las estaciones radiométricas en la segunda columna y la diferencia porcentual

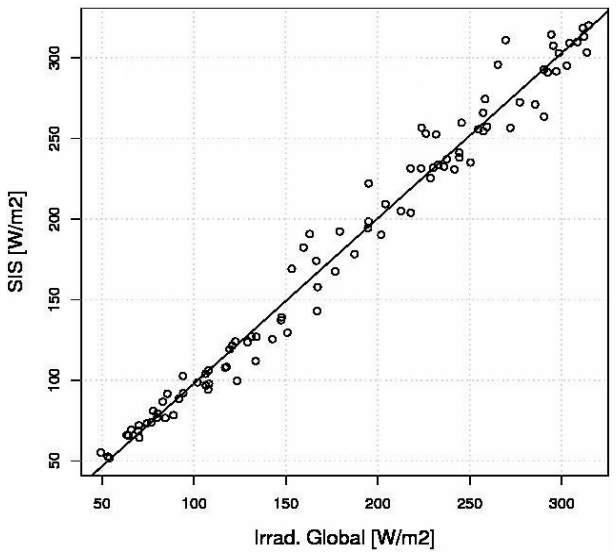

Figura 6. Recta de correlación lineal de los datos satelitales de irradiancia (*Surface Incoming Shortwave Radiation*, SIS) frente a los datos de irradiancia global procedente de 8 estaciones radiométricas para el año 2006. R^2 = 0,979, RMSD = 12,5 W m^{-2}, MAB = 9,1 W m^{-2} (5%).

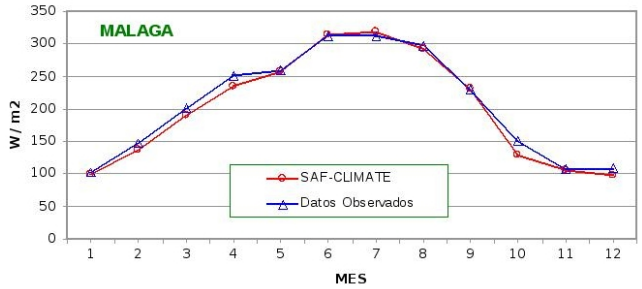

Figura 7. Evolución de los valores promedios mensuales diarios de *Surface Incoming Shortwave Radiation* (SIS) (línea roja) junto con los valores de irradiancia global (línea azul) para la estación radiométrica de Málaga.

entre las medidas y los valores de SIS, así como las localizaciones de las estaciones radiométricas utilizadas en la tercera columna.

Se observa, en general, una muy buena concordancia entre los valores procedentes de ambas fuentes de información, con gran similitud en los gradientes latitudinales de irradiancia global observados, e incluso reproduciéndose parecidas estructuras en el contorneo de las medidas. Los campos de las diferencias porcentuales muestran un color verde predominante indicando valores muy bajos. Incluso en los meses de máxima insolación (mayo, junio y julio) en los que además existen mayores gradientes latitudinales de irradiancia, se observa un buen acuerdo entre los datos y se reproducen similares estructuras.

Tabla 3. Comparación de valores medios mensuales para 2006 de datos del producto *Surface Incoming Shortwave Radiation* (SIS) frente a valores medios mensuales de irradiancia global in-situ procedente de 8 estaciones radiométricas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Las definiciones de los acrónimos usados en la tabla son *Mean Absolute Bias* (MAB), *Mean Bias Deviation* (MBD) y *Root Mean Standard Deviation* (RMSD).

Estación Radiométrica	Latitud	Longitud	Media SIS (W m^{-2})	Media in situ (W m^{-2})	MAB (W m^{-2})	MBD (W m^{-2})	RMSD (W m^{-2})	[Coef. Corr.]^2 R^2
Almería	2° 23' 17"W	36° 50' 35"	199,9	205,4	7,5	-5,4	9,8	0,99
Barcelona	2° 12' 05"E	41° 23' 27"	184,4	171,7	14,1	12,7	19,0	0,98
Bilbao	2° 54' 21"W	43° 17' 53"	151,1	144,6	10,2	6,5	13,9	0,98
Coruña	8° 25' 10"W	43° 22' 02"	159,8	158,7	8,3	1,1	10,3	0,98
Madrid	3° 43' 27"W	40° 27' 10"	187,5	191,2	6,1	-3,7	8,4	0,99
Málaga	4° 28' 49"W	36° 43' 09"	200,6	206,5	7,6	-5,9	9,7	0,99
Valencia	0° 28' 16"W	39° 29' 22"	185,4	182,5	10,5	2,8	13,5	0,99
Zaragoza	1° 04' 18"W	41° 40' 44"	179,9	188,1	8,8	-8,2	12,1	0,99
			181,1	181,1	9,1	0,0	12,5	0,98

Tabla 4. Resumen de las variaciones relativas de los diferentes indicadores estadísticos. Ver las definiciones de los acrónimos en la leyenda de la Tabla 3.

Estación Radiométrica	MAB (%)	MBD (%)	RMSD (%)
Almería	3,7	-2,6	4,8
Barcelona	8,2	7,4	11,1
Bilbao	7,0	4,5	9,6
Coruña	5,2	0,7	6,5
Madrid	3,2	-1,9	4,4
Málaga	3,7	-2,8	4,7
Valencia	5,7	1,5	7,4
Zaragoza	4,7	-4,4	6,4
	5%	0%	7%

Quizá la única excepción sea el mes de octubre, en el que hay una diferencia apreciable entre las medidas en la zona del centro peninsular. Estas discrepancias podrían ser debidas al hecho de que el algoritmo utilizado para el cálculo del SIS no tiene en cuenta, por el momento, las nubes de hielo.

El CM-SAF lleva a cabo validaciones periódicas de los datos producidos utilizando principalmente estaciones de referencia pertenecientes a la red BSRN en distintos emplazamientos de Europa y Africa cubriendo diferentes climas y tipos de suelo. En Europa se utilizan para la realización de estas validaciones únicamente 6 estaciones radiométricas y sólo una de ellas está ubicada en España, la Plataforma Solar de Almería, que fue aceptada en la red BSRN en 2006. Se pueden consultar los informes acerca de estas validaciones en la página oficial del CM-SAF (www.cmsaf.eu.de, *Documentation*). En base a los requerimientos de precisión que se han estimado necesarios para la elaboración de análisis climáticos, el CM-SAF se ha propuesto como objetivo una precisión de 10 W m^{-2} en los valores medios mensuales de irradiancia de onda corta (Mueller et al., 2009). En la Tabla 3 se muestran los resultados de la comparación de los valores medios mensuales para el año 2006 de los datos del SIS con los valores de irradiancia media mensual obtenida en 8 estaciones radiométricas de la red de AEMET elegidas de manera que se pueden considerar una muestra representativa de la región de estudio. La Tabla 4 muestra un resumen de las desviaciones relativas de los distintos indicadores estadísticos. Como se puede observar, el MAB (*Mean Absolute Bias*) y el MBD (*Mean Bias Deviation*) se mantienen en la mayoría de los casos por debajo del valor umbral establecido por el CM-SAF, siendo los resultados similares a los obtenidos en las validaciones oficiales del CM-SAF. Por otro lado, el MAB en tanto por ciento con respecto a los valores en tierra se mantienen del orden del 5% como ya se podía estimar en la Figura 5. Así mismo, se puede comprobar que el error sistemático medio, indicado por el valor de MBD, es en promedio inapreciable. Es igualmente destacable el valor muy próximo a la unidad del cuadrado del Coeficiente de Correlación de Pearson, indicando una excelente correlación entre los datos in-situ y los valores satelitales. Esta buena correlación puede ser también observada en la Figura 6, en la que se representan todos los valores mensuales para los 8 emplazamientos definidos en la Tabla 3 frente a los valores de SIS interpolados en dichas ubicaciones, obteniéndose un valor del cuadrado del Coeficiente de Correlación de Pearson de 0,979.

En la Figura 6 se muestra la recta de correlación lineal de los valores de SIS frente a los promedios mensuales de irradiancia en 8 estaciones junto con los valores de MAB y de la Desviación Cuadrática Media (RMSD, *Root Mean Standard Deviation*) con valores de 9,1 W m^{-2} y 12,5 W m^{-2} respectivamente.

Con el fin de estudiar la evolución de las diferencias a lo largo del año entre los valores promedios mensuales diarios de SIS y los valores de irradiancia global observados in-situ, se han representado conjuntamente en la Figura 7 los valores de irradiancia global medios para cada mes del año para la estación radiométrica de Málaga en azul y las medidas de SIS

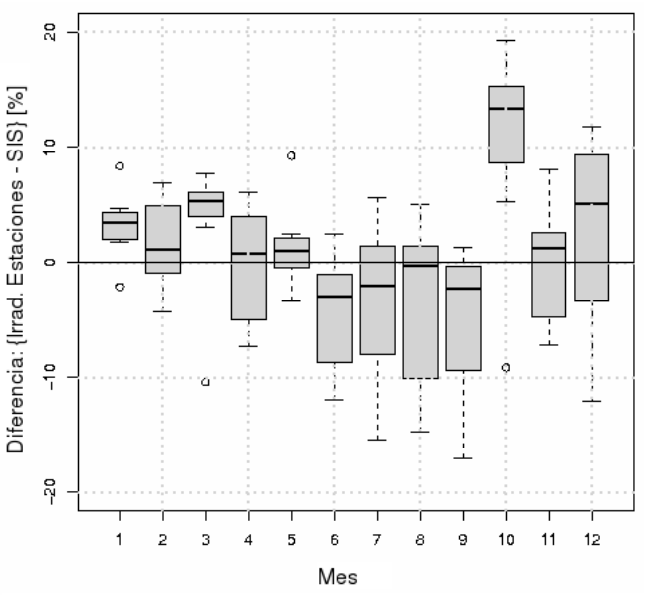

Figura 8. Diferencias en % de las medidas de irradiancia global medida en 8 estaciones radiométricas respecto a los valores satelitales de *Surface Incoming Shortwave Radiation* (SIS) para cada mes del año 2006.

interpoladas para la localización geográfica de dicha estación radiométrica en rojo.

Cabe destacar igualmente la gran similitud de los datos de ambas fuentes de información, incluso durante los meses de máxima variación de la irradiancia global. Es decir, en los meses próximos a los equinoccios, de marzo a mayo y de septiembre a noviembre. Ambas fuentes de datos muestran una mayor pendiente en la disminución de la irradiancia global durante los meses de otoño que la correspondiente al aumento de la irradiancia durante los meses de primavera.

No se observa una diferencia sistemática entre las dos fuentes de datos a lo largo del año 2006 salvo en el mes de octubre, en el que parece apreciarse una subestimación de los datos de SIS respecto a las medidas realizadas en las estaciones radiométricas.

En la Figura 8 se representan las diferencias porcentuales a lo largo del año utilizando los valores de irradiancia para las 8 estaciones seleccionadas, observándose nuevamente que las diferencias se mantienen dentro del 5% en la mayoría de los meses para todas las estaciones con la excepción de la subestimación sistemática en el mes de octubre de los datos de SIS con respecto a la irradiancia global medida en tierra.

5 Conclusiones

Se han analizado los datos del producto SIS procedentes del CM-SAF, obtenidos a partir de las medidas del instrumento SEVIRI a bordo del satélite MSG y del instrumento AVHRR en los satélites polares de la NOAA y se han comparado con los valores promedios mensuales de irradiancia global diaria medidos en 40 estaciones de la RRN en banda ancha de AEMET. Los resultados muestran una gran similitud de los datos procedentes de ambas fuentes de información, siendo en general las discrepancias encontradas en promedio en torno a 5%, en concordancia con los resultados obtenidos en las validaciones oficiales llevadas a cabo por el CM-SAF utilizando como referencia las estaciones radiométricas pertenecientes a la red BSRN. Así mismo la correlación lineal entre los datos satelitales de irradiancia estimada en superficie y los obtenidos desde estaciones en tierra es muy aceptable. Los resultados de este trabajo hacen muy recomendable el uso de SIS para la realización de otros estudios como, por ejemplo, un atlas de radiación solar, y animan a seguir evaluando otros productos elaborados por el proyecto CM-SAF.

Agradecimientos. Para la realización de este trabajo se han utilizado datos del producto SIS proporcionados de forma gratuita por el CM-SAF de EUMETSAT, liderado por el Servicio Meteorológico Alemán (DWD) (www.cmsaf.eu).

Referencias

CM-SAF, 2010: Annual Product Quality Assessment Report 2009, Doc. No: SAF/CM/DWD/VAL/OR5. Ver. 1.1.

Mayer, B. y Kylling, A., 2005: *Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations -description and examples of use*, Atmos Chem Phys, **5**, 1855–1877.

Mueller, R., Dagestad, K., Ineichen, P., Schroedter-Homsceidt, M., Cros, S., Dumortier, D., Kuhlemann, R., Olseth, J. A., Piernavieja, G., Reise, C., Wald, L., y Heinemann, D., 2004: *Rethinking satellite based solar irradiance modelling. The SOLIS clear-sky module*, Remote Sens Environ, **91**, 160–174.

Mueller, R., Matsoukas, C., Gratzki, A., Behr, H. D., y Hollmann, R., 2009: *The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance - A LUT based eigenvector hybrid approach*, Remote Sens Environ, **113**, 1012–1024.

Pinker, R. T. y Laszlo, I., 1992: *Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Applications on a Global Scale*, J Appl Meteorol, **31**, 194–211.

Schulz, J., Albert, P., Behr, H. D., Caprion, D., Deneke, H., Dewitte, S., Dürr, B., Fuchs, P., Gratzki, A., Hechler, P., Hollmann, R., Johnston, S., Karlsson, K. G., Manninen, T., Müller, R., Reuter, M., Riihelä, A., Roebeling, R., Selbach, N., Tetzlaff, A., Thomas, W., Werscheck, M., Wolters, E., y Zelenka, A., 2009: *Operational climate monitoring from space: the EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF)*, Atmos Chem Phys, **9**, 1687–1709.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., y Kiehl, J., 2009: *Earth's global energy budget*, Bull Amer Meteorol Soc, **90**, 311–324.