

DESARROLLOS METODOLÓGICOS PARA EL ANÁLISIS DE LARGAS SERIES DE DATOS SOBRE ZONAS EXTENSAS. APLICACIÓN AL CÁLCULO DEL BALANCE DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA CUENCA DEL MEDITERRÁNEO

Ernesto LÓPEZ-BAEZA*, Alejandro BODAS**

Rodrigo IRURZUN*, Juan Carlos FORTEA* y Pablo DEL RIO***

*Unidad de Investigación de Teledetección. Fac. de Física. Universitat de València

** Becario FPI. Conselleria de Cult., Educ. y Ciencia. Generalitat Valenciana

***Instituto Nacional de Meteorología (INM) (Madrid)

RESUMEN

En este trabajo se muestra la conveniencia de utilizar productos meteorológicos operativos en los algoritmos de teledetección para hacer que estos sean a su vez operacionales al aplicarlos a largas series de datos sobre zonas extensas. Se ponen diferentes ejemplos en relación con la estimación del balance de radiación solar en superficie para la cuenca de Mediterráneo.

Palabras clave: Algoritmos de teledetección, Balance de radiación solar, Cuenca del Mediterráneo, Productos meteorológicos operativos.

ABSTRACT

In this work we show the advantages of including some operational meteorological products in the remote sensing algorithms to make them operational as well for the analysis of long data sets over large extended areas. Some examples are shown in relation to the estimation of the surface shortwave radiation balance over the Mediterranean basin.

Key words: Mediterranean basin, Operational meteorological products, Remote sensing algorithms, Surface shortwave radiation balance.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del marco del Proyecto RESMEDES (*Remote Sensing of Mediterranean Desertification and Environmental Stability*), pudimos extender nuestra metodología para la estimación del albedo de la superficie y del balance de radiación solar a toda la cuenca del Mediterráneo. La continuación de este proyecto es RESYSMED (*RESMEDES Synthesis of Change Detection Parameters Into a Land-Surface Change Indicator for Long-Term Desertification Studies*), donde el énfasis se pone ahora en la capacidad de analizar largas series de datos sobre dicha zona tan extensa.

El flujo de radiación neta en superficie es una de las magnitudes físicas de interés en RESYSMED, como indicadora de cambios en sí misma, y por su relación con el proceso de aridificación o de degradación desde una condición de cobertura desarrollada de vegetación. Es una de esas magnitudes “avanzadas” cuya elaboración a partir de datos primarios requiere de una cierta modelización, ya que dicha magnitud integra los efectos de casi todas las magnitudes restantes (albedo, características y propiedades del suelo y de la cobertura vegetal, temperatura, emisividad, humedad atmosférica, contenido en humedad del suelo, etc). Además, como medida de la energía disponible, la radiación neta es un parámetro clave para la deducción de los demás flujos de energía.

Actualmente, la radiación neta en superficie debe obtenerse a partir de los flujos hacia arriba y hacia abajo de onda corta y de onda larga en superficie, pero en un futuro ya muy próximo, con el advenimiento de los nuevos sensores, se podrá obtener directamente a partir de los datos del instrumento GERB (*Geostationary Earth Radiation Budget*), a bordo del satélite *METEOSAT Segunda Generación* (MSG), a partir de octubre del año 2000.

Los flujos de radiación de onda corta incidente y reflejada que componen el balance de radiación solar tienen, además, un interés particular (SUTTLES y OHRING, 1986). La radiación solar neta representa el flujo de radiación absorbido por la superficie, y nuestro interés actual es poder obtenerla de forma operacional estudiando largas series de datos sobre zonas muy extendidas como es el caso de la cuenca del Mediterráneo.

2. ANÁLISIS DE LA NUBOSIDAD

Las nubes influyen notablemente sobre la cantidad, distribución y evolución de los flujos de radiación en superficie. Así, el estudio de la evolución de la distribución de la cobertura nubosa para diferentes tipos de nubes es de importancia fundamental en los estudios de balance de radiación y de energía en superficie.

El primer parámetro que influye en la radiación solar neta en superficie es la cobertura nubosa. Un aspecto dificultoso en la estimación de los flujos de radiación es la conocida y fuerte variación diurna de los procesos nubosos, lo cual hace que las observaciones desde una órbita estacionaria sean muy adecuadas e incluso necesarias gracias a la alta resolución temporal. Así, la tendencia diurna de la nubosidad y de los tipos de nubes puede estimarse mediante evaluación de los datos homogéneos de METEOSAT, el cual observa la escena cada media hora.

Un método eficiente para realizar la clasificación de tipos de nubes en zonas extensas es mediante la aplicación de filtros altamente no lineales siguiendo técnicas de morfología matemática y realizando dilataciones y erosiones sucesivas directamente sobre el histograma bidimensional compuesto a partir de las imágenes visible (VIS) e infrarroja (IR) de METEOSAT. La Figura 1 muestra el proceso de clasificación aplicado separadamente sobre mar y sobre tierra.

Los productos meteorológicos operativos son una fuente de información muy conveniente que pueden utilizarse en diferentes fases de los algoritmos de teledetección. Nos referimos tanto a las observaciones sistemáticas de la red sinóptica de superficie como a los productos intermedios que pueden extraerse de los *Modelos de Predicción Numérica* (MPN). Ambas series de datos pueden utilizarse, bien como datos de entrada en el esquema de corrección atmosférica, o bien como medi-

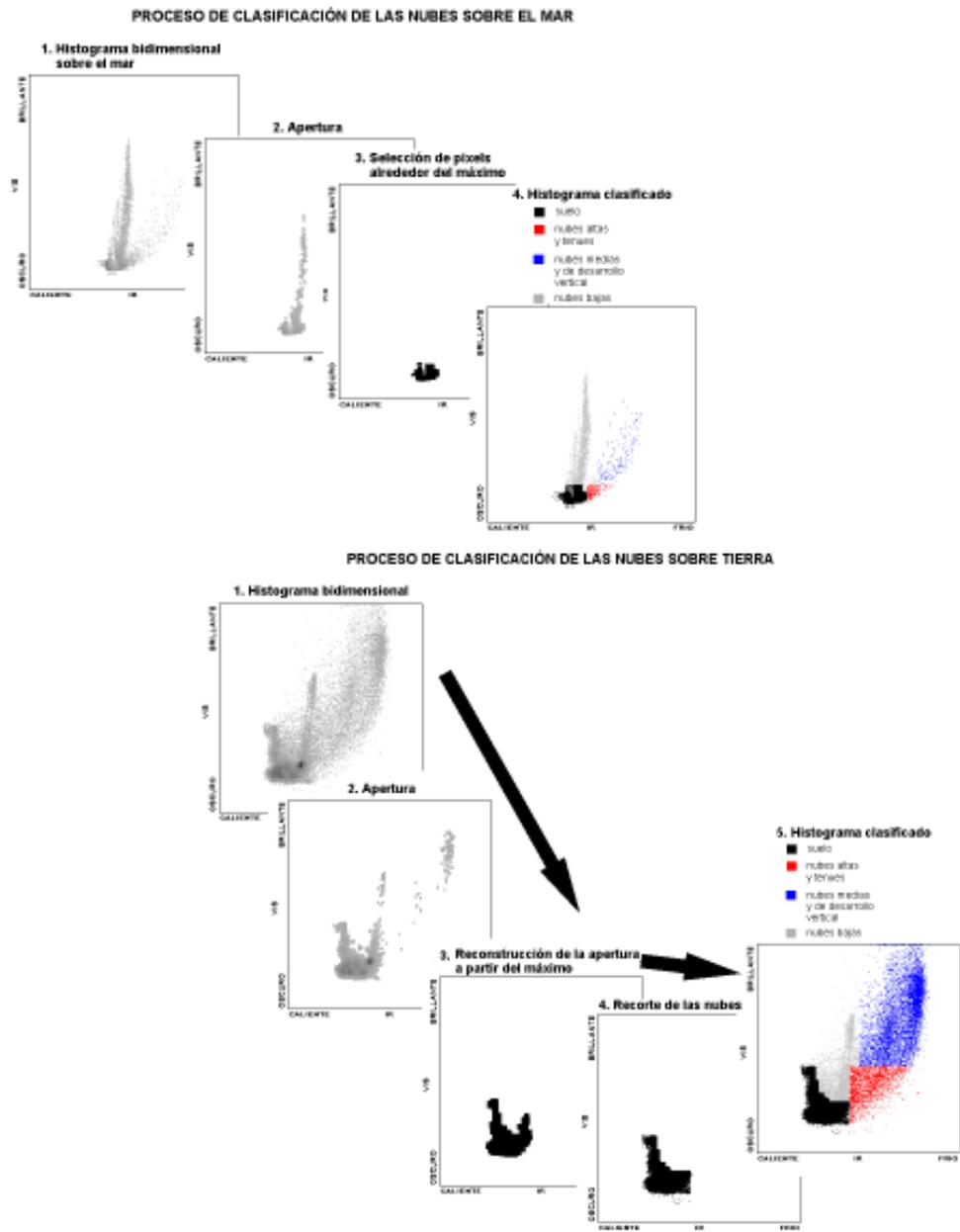


Figura 1. Proceso de clasificación morfológica de la nubosidad

das de referencia para la validación de productos de teledetección. En este trabajo se han empleado observaciones sistemáticas de nubosidad procedentes de la red sinóptica de superficie y datos de cobertura nubosa obtenidos del Modelo HIRLAM/INM (*High Resolution Limited Area Model* del INM), para así validar los análisis de nubosidad obtenidos a partir de las imágenes VIS e IR de METEOSAT. La comparación con observaciones de superficie es de difícil interpretación cuando el número de casos es reducido, fundamentalmente debido a los puntos de vista tan diferentes de las medidas originales, del observador en superficie y del satélite. Así, las mayores diferencias que se dan para nubes bajas y algunas medias, podrían interpretarse probablemente como nieblas desde la observación en superficie que incluso pueden haberse disipado durante el tiempo que media entre los dos tipos de observaciones. La comparación con los análisis de cobertura nubosa del HIRLAM/INM es buena, incluso cuando aquélla se realiza sobre una región proporcionalmente pequeña de la imagen, correspondiente a la Península Ibérica. A título de ejemplo se muestra el histograma de

diferencias entre observaciones de superficie y de satélite (Fig. 2).

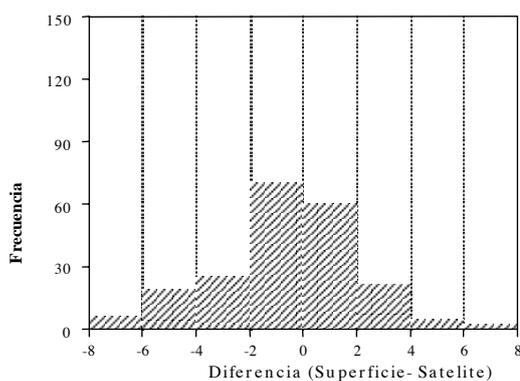


Figura 2. Comparación entre la estimación de la cobertura nubosa por las estaciones de la red sinóptica del INM y por el análisis de los datos del satélite METEOSAT. En la comparación se incluyen todos los tipos de nubes observados en todos los casos disponibles. Los resultados se expresan como diferencias en octas.

3. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Con el resultado de la clasificación de nubes, la irradiancia global en superficie puede estimarse separadamente para los pixels nubosos y para los pixels despejados. Para estos últimos, la irradiancia directa en superficie puede obtenerse a partir de los códigos de transferencia radiativa. Como datos de entrada para estimar los efectos atmosféricos se necesitan medidas de los diferentes parámetros meteorológicos que representan la situación atmosférica de hecho. Así, la variabilidad espacial y temporal del agua precipitable debe establecerse con suficiente precisión en la zona de estudio. También debe conocerse el espesor óptico de los aerosoles (o la visibilidad horizontal como una aproximación), el cual da cuenta de la concentración, tipo (o tipos mezclados) y tamaño de los aerosoles presentes en la atmósfera. También es necesario conocer la concentración de ozono, la cual puede considerarse casi constante sobre una base estacional.

3.1. Mapas de agua precipitable

Los mapas de agua precipitable pueden utilizarse como datos de entrada en el esquema de la corrección atmosférica. Por una parte, se han utilizado estos mapas que se han obtenido como productos intermedios del Modelo HIRLAM/INM, para corregir imágenes de la Península Ibérica, y también otros mapas de más baja resolución, los cuales se han obtenido a partir de los datos de los análisis globales del ECMWF (*European Center for Medium Weather Forecast*), referidos a la cuenca del Mediterráneo y remuestreados a la escala de METEOSAT.

La concentración del vapor de agua atmosférico puede calcularse a partir de los radiosondeos operativos de los Centros Meteorológicos Nacionales a las 0:00 h y 12:00 h. Sería posible interpolar espacialmente estos datos para estimar la variación espacial del vapor de agua para ambos momentos de observación en el día.

Un procedimiento operacional y fiable que puede actualizarse cada 6 horas es obtener la cantidad de agua precipitable integrada sobre una columna atmosférica donde los Modelos de Predicción Numérica calculan la humedad específica. De esta forma hemos podido obtener buenos mapas de agua precipitable que se han podido utilizar como datos de entrada en el proceso de corrección atmosférica

En Junio de 1991, el modelo de predicción numérica operativo del Instituto Nacional de Meteorología era el LAM (*Limited Area Model*) de 0.91° de resolución en latitud. El modelo operativo actual es el ya mencionado HIRLAM/INM, de 0.5° de resolución en latitud. La necesidad de analizar datos de Junio de 1991 en el contexto del Proyecto RESMEDES (MELIÁ, LÓPEZ-BAEZA, *et al.*, 1997) motivó, por parte del INM, la conveniencia de programar una ejecución retrospectiva original del HIRLAM/INM para el 23 de Junio de 1991, en lugar de buscar en los archivos de análisis del LAM. Así, se realizó una integración 00Z para dicha fecha, a partir de la cual se pueden obtener predicciones de vapor de agua precipitable, cobertura nubosa y temperatura del techo de las nubes en los 31 niveles verticales del HIRLAM/INM, para las 06Z, 12Z y 18Z, con una rejilla de 194 columnas (longitud) y 100 filas (latitud, para barrer un área que se extiende desde -65.5 W a 30.0 E y desde 15.5 N a 65.0 N. La ejecución del modelo utilizó las observaciones necesarias y los análisis en 19 niveles en la vertical del ECMWF como condiciones de contorno. El campo previo fue la predicción H+6 de la ejecución del HIRLAM/INM correspondiente a las 18Z del 22 de Junio de 1991, que también se tuvo que hacer retrospectivamente.

La cantidad de vapor de agua precipitable integrada sobre toda la columna para cada una de las 19400 celdillas se calcula a partir de los valores puntuales de humedad específica correspondientes a los 31 niveles híbridos del modelo, hasta los 200 hPa donde la humedad específica es prácticamente 0 en todas las celdillas. La comparación del vapor de agua precipitable así obtenido con el que resulta de la integración de los radiosondeos operacionales del INM en la Península Ibérica para las 12:00 h es buena excepto en las estaciones donde los radiosondeos fueron deficientes o incompletos. Los valores que se obtienen sobre la península varían entre 1.2 y 2.6 g/cm².

Los análisis del ECMWF proporcionan datos globales de temperatura, humedad relativa, geopotencial y presión atmosférica en 14 niveles de la atmósfera con una resolución de 1° x 1°, para las 0:00 h, 6:00 h, 12:00 h y 18:00 h. Puede, pues, también obtenerse el vapor de agua precipitable integrando para cada columna. En este trabajo se ha seleccionado una ventana sobre el Mediterráneo que se ha

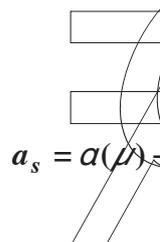
remuestreado a la escala de METEOSAT-5.

3.2. Espesor óptico de los aerosoles

El espesor óptico de los aerosoles puede obtenerse con precisión comparando la irradiancia global medida en superficie y la misma magnitud obtenida por simulación mediante el código de transferencia utilizado cuando se va modulando con diferentes valores que pueden caracterizar al tipo, distribución y tamaño de los aerosoles. Este procedimiento se ha ensayado con buenas medidas de campo y los resultados son aceptables con sensores de tan diferente resolución espacial como el METEOSAT (FORTEA *et al.*, 1997) y el LANDSAT-5 TM (ZAHONERO, 1998 y ZAHONERO *et al.*, 1998). Sin embargo, el método no puede ser todavía operacional mientras no se consigan suficientes medidas precisas y calibradas de la irradiancia global en superficie distribuidas por la zona extensa de estudio. Mientras tanto, una solución menos precisa pero bastante operativa puede ser utilizar medidas alternativas de visibilidad, también procedentes de la red sinóptica.

4. ESTIMACIÓN OPERACIONAL DEL FLUJO DE ONDA CORTA ABSORBIDO POR LA SUPERFICIE EN LA CUENCA DEL MEDITERRÁNEO

LI *et al.* (1993) propusieron una relación lineal entre el flujo reflejado en el techo de la atmósfera y el flujo absorbido por la superficie, incluyéndose de manera explícita la dependencia del ángulo solar cenital. Esta dependencia explícita proporciona una mejora respecto a otros métodos, ya que la relación obtenida es independiente del espesor óptico de las nubes y del albedo de la superficie. De este modo, se puede estimar el flujo solar neto en la superficie también bajo cielo nublado. La relación propuesta, ya normalizada por la irradiancia incidente en el techo de la atmósfera, es:



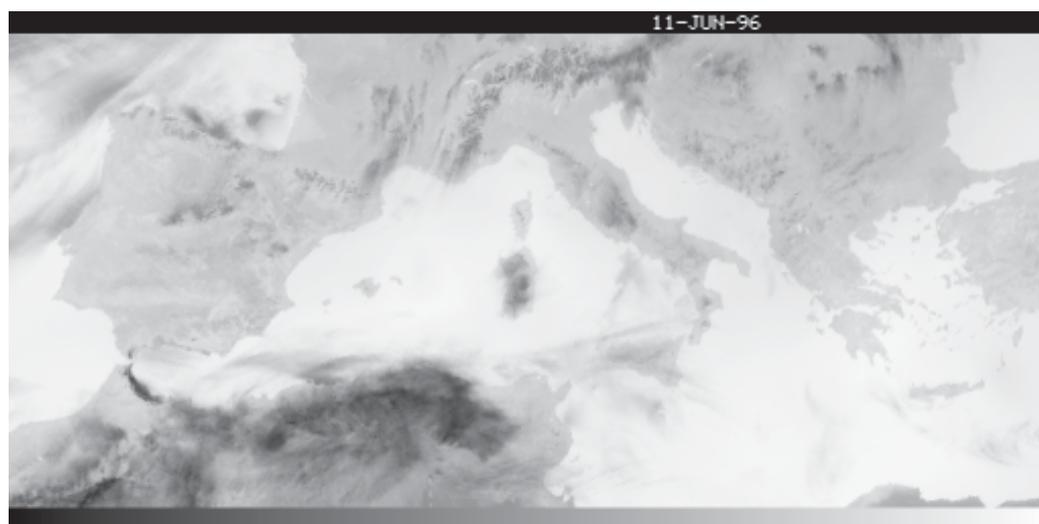
$$a_s = a(\mu)$$

donde a_s es la fracción de la irradiancia incidente en el techo de la atmósfera (TOA) absorbida por la superficie, r el albedo planetario y μ el coseno del ángulo solar cenital. Tanto la ordenada en el origen como la pendiente de esta relación están parametrizadas para diferentes tipos de nubes y corregidas por el efecto del vapor de agua. Para aplicar el modelo será necesario por tanto disponer de las siguientes entradas: albedo en el techo de la atmósfera, clasificación de nubes y agua precipitable. El albedo planetario puede obtenerse directamente a partir de los datos del canal VIS de METEOSAT y los otros dos componentes se han explicado anteriormente. En la Figura 3 presentamos como ejemplo el flujo de onda corta absorbido por la superficie en la cuenca del Mediterráneo entre las 6:00 y las 17:00 horas GMT del 11 de junio de 1996, obtenido integrando los resultados proporcionados por el método descrito para cada imagen (*slot*) de METEOSAT.

5. CONCLUSIONES

El método de LI *et al.* (1993) es altamente conveniente para estimar el flujo de radiación absorbido por la superficie terrestre de forma operacional analizando largas series de datos sobre zonas muy extendidas, como puede ser la cuenca del Mediterráneo. Su parametrización es muy sencilla e

implica clasificar la nubosidad en diferentes tipos de nubes y conocer el contenido en agua precipitable en la atmósfera. Los métodos de morfología matemática son muy eficaces para realizar la clasificación de nubes porque pueden actuar sobre toda la imagen, sin necesidad de seccionarla en zonas pequeñas. También hemos podido comprobar cómo los análisis y/o predicciones de los MPNs pueden proporcionar mapas del agua precipitable existente (o al menos su valor realista) en la



atmósfera en diferentes escalas espaciales, de acuerdo con la resolución requerida en el trabajo.

0 15 30
(MJ/m²)

Figura 3. Flujo de onda corta absorbido por la superficie en la cuenca del Mediterráneo entre las 6:00 y las 17:00 horas GMT del 11-06-96.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FORTEA, J.C., VALIENTE, J.A. y LÓPEZ-BAEZA, E. (1997): "Surface albedo from METEOSAT-4 data. Accurate atmospheric correction using ground data". VII Congreso Nacional de Teledetección, Santiago de Compostela, 24-28 Junio 1997.
- LI, Z., LEIGHTON, H.G., MASUDA, K. y TAKASHIMA, T. (1993): "Estimation of SW Flux Absorbed at the Surface from TOA Reflected Flux". *Journal of Climate*, Vol. 6, No. 2: 317-330.
- MELIÁ, J., LÓPEZ-BAEZA, E., *et al.* (1997): Contribution of the University of Valencia. *Remote Sensing of Mediterranean Desertification and Environmental Changes (RESMEDES)*. Final Report. Contract No.: ENV4-CT95-0094.

SUTTLES, J.T. y OHRING, G. (1986): *Report of the workshop on surface radiation budget for climate applications*. WCP-115, O. M. M..

ZAHONERO, M.J. (1988): *Corrección Atmosférica de Imágenes LANDSAT para el Cálculo del Mapa de Albedo*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Junio 1998 (Director: Dr. E. Lopez-Baeza, Tutor en el Centro: Dr. J.M. Fuster).

ZAHONERO, M.J., MARCHUET, E., LÓPEZ-BAEZA, E., VALIENTE, J.A. y FUSTER, J.M. (1998): "Corrección atmosférica precisa de imágenes LANDSAT-TM utilizando medidas en el suelo. Obtención de mapas de albedo de alta resolución espacial". En F. FERNÁNDEZ GARCÍA, E. GALÁN GALLEGO Y R. CAÑADA TORRECILLA (Eds.) *Clima y Ambiente Urbano en Ciudades Ibéricas e Iberoamericanas*, Capítulo 4.5, 449-460.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca específicamente dentro de los Proyectos RESMEDES y RESYSMED, y también dentro del Proyecto *Integración de Parámetros Climáticos y Medidas de Satélite para Estudios Regionales de la Cubierta Vegetal. Estudio del Impacto de la Degradación de los Cultivos Extensivos y de los Incendios Forestales* del Programa Nacional de I+D sobre el CLIMA. Es importante reconocer la ayuda prestada por el Instituto Nacional de Meteorología, por la provisión de datos de visibilidad, nubosidad, radiación solar y los productos intermedios derivados del HIRLAM/INM, cuya ejecución retrospectiva fue especial para la realización del trabajo. Similarmente, se reconoce la utilización de datos de análisis del ECMWF, conseguidos a través del Dr F. Olesen de la Universidad de Karlsruhe e imágenes METEOSAT procedentes de la Universidad Libre de Berlin.

