

Seguimiento mediante teledetección de áreas amenazadas por la desertificación: proyectada EFEDA

*E. López Baeza¹; J. Meliá¹; V. Caselles¹; C. Coll; J.C. Fortea; V. Gandía¹;
M.A. Gilbert¹; J. Moreno¹; M. Núñez²; J. De la Rubia¹; D. Segarra¹;
J.A. Sobrino¹; J. Tamayo³; J.A. Valiente²; E. Valor¹*

(1) Unidad de Investigación de Teledetección
Universitat de València

(2) Dept of Geography and Environmental Studies
University of Tasmania, Hobart (Australia)

(3) Centro Meteorológico de Valencia
Instituto Nacional de Meteorología

RESUMEN

En junio de 1991, más de 150 científicos pertenecientes a 30 centros de investigación trabajaron en Castilla-La Mancha estudiando los procesos de transferencia de energía y de agua entre el suelo, la vegetación y la atmósfera en condiciones semiáridas dentro del marco del proyecto EFEDA (European Field Experiment in Desertification-threatened Areas) de la Unión Europea. Las medidas realizadas se extendían desde la microescala (plantas individuales) hasta la escala compatible con el tamaño del reticulado de los modelos globales. Para este propósito, se seleccionaron tres zonas de estudio separadas entre sí unos 70 km y en las que se instaló un fuerte equipamiento e instrumentación a una escala de 30 km². Para pasar de esta escala a la zona completa de estudio, se utilizaron como puente medidas tomadas desde avión, desde satélite y desde equipos móviles.

SUMMARY

In June 1991 more than 150 scientists from 30 research centers worked in Castilla-La Mancha, studying the energy and water transfer processes between the soil, the vegetation and the atmosphere under semi-arid conditions within the framework of the EFEDA (European Field Experiment in a Desertification-threatened Area) Project of the European Union. The measurements went from microscale (over individual plants) up to a scale compatible with the grid size of global models. For this purpose, three study areas were selected separated about 70 km apart from each other where large pieces of equipment and instrumentation were installed at a scale of 30 km². In order to be able to pass from this scale to the scale of the whole study area, bridge measurements were used obtained from aircraft, satellite and mobile equipment.

Introducción

La disponibilidad de agua representa un papel cada vez más importante y crítico en nuestro mundo cambiante, en la ecología, economía y desarrollo de los climas regionales. Se necesita un conocimiento profundo de las interacciones meteorológicas, hidrológicas y biológicas para poder estimar los impactos de los cambios climáticos que se esperan, que, junto con una intensificación del uso del suelo, conducen a la degradación y a la desertificación en los países mediterráneos.

La desertificación se entiende como un proceso de reajuste entre los diferentes flujos de agua cerca de la superficie, que reduce su disponibilidad para el crecimiento de la vegetación, favoreciéndose la supervivencia sólo de las especies que pueden adaptarse a condiciones más secas. Los factores detonantes de la inicialización de este proceso son la variabilidad climática y los cambios en las prácticas del uso del suelo. La reducción de la precipitación puede no ser la única razón de la degradación de la tierra. Tan importantes son los desfases en el tiempo o en la frecuencia de las precipitaciones como la intensidad de los acontecimientos ocasionales. En un paisaje vulnerable, el pastoreo, los incendios forestales, las tormentas que causan erosión hídrica y eólica y la explotación de las aguas subterráneas pueden intensificar el proceso.

En muchas zonas mediterráneas, el nivel medio anual de las aguas subterráneas decrece como resultado del régimen cambiante de las precipitaciones, del uso del suelo y de la sobreexplotación de los recursos acuíferos, lo cual hace que el agua disponible sea menos útil debido a la salinización. La desconexión creciente entre la capa de suelo superficial y el nivel freático va impidiendo la transferencia de agua a través de la zona no saturada, y el laboreo de la tierra cambia las características hidrológicas del suelo. El déficit de agua se compensa a menudo mediante sistemas de riego, perdiéndose una gran cantidad de agua subterránea por procesos extensivos de evaporación.

En el marco del *European Programme on Climate and Natural Hazards (EPOCH)*, la Unión Europea, Dirección General XII, conjuntamente con científicos e investigadores europeos, desarrollaron el *European International Project on Climatic and Hydrological Interactions Between Vegetation, Atmosphere and Landsurfaces (ECHIVAL)* (Bolle et al., 1989) en el que se estudian los procesos responsables de los intercambios de agua y de energía y de su estabilidad en zonas semiáridas. Así podrán establecerse las bases para el desarrollo de una estrategia que sirva para reducir y contrarrestar la amenaza de una desertificación progresiva. El objetivo fundamental de este programa de investigación es llegar a entender entre otras, las interacciones entre el suelo, la vegetación y la atmósfera como componentes del sistema Tierra, la posible respuesta de estas interacciones al cambio climático así como al creciente

impacto de la humanidad en el desarrollo de los ecosistemas naturales y el efecto de feedback de los cambios en la superficie terrestre sobre el sistema climático. El programa de investigación de ECHIVAL se dirige a problemas tales como el estudio de los *procesos* de interacción entre la vegetación y el suelo subyacente con la atmósfera a escalas compatibles con el reticulado propio de los modelos climáticos, del orden de 10^4 a 10^5 km², la *parametrización* de los procesos en la superficie de la tierra para poder incluirlos en los modelos climáticos y así mejorar su capacidad de predicción. Muchos procesos físicos y dinámicos importantes se dan a escalas espaciales y temporales mucho más pequeñas que las resoluciones límite típicas de los modelos numéricos o de los sistemas de observación global. Tales procesos no pueden incluirse directamente en dichos modelos, pero sin embargo, sus efectos estadísticos deben considerarse a esa escala más amplia y determinarse en función de las variables adecuadas. Esta técnica se llama *parametrización* (Smagorinsky, 1974) porque normalmente introduce una serie de variables empíricas (parámetros) en la consideración de dichos procesos en el modelo, la adquisición de los *datos* necesarios para los estudios de diagnóstico de cambios en las características de la superficie terrestre y de su influencia en las interacciones suelo - vegetación - atmósfera, y para introducirlos como datos de entrada de la capa límite atmosférica en los modelos globales, y la capacidad de *traducir las predicciones de los modelos climáticos ("scenarios")* en información sobre el impacto regional del cambio climático, y viceversa, el feedback de los cambios de la superficie terrestre en el clima.

Como puede suponerse, un aspecto esencial de este enfoque en la investigación es poder relacionar los resultados experimentales obtenidos necesariamente a nivel local, con la información global propia de los modelos. Los datos de satélite juegan un papel fundamental en esta técnica de parametrización, sirviendo de puente entre ambas descripciones. Esto implica que los algoritmos utilizados para inferir información –en términos de magnitudes físicas– a partir de las radiancias medidas por los satélites, necesitan ser validados empíricamente a la escala global propia de la observación del satélite. Fue en este contexto donde se desarrolló la idea de *EFEDA (Echival Field Experiment in Desertification-Threatened Areas)* (Bolle and Shuttleworth 1989, Bolle et al., 1993).

EFEDA es sólo un primer paso, en el contexto europeo, para reunir a la comunidad científica interdisciplinar interesada en el estudio de los procesos de la superficie de la tierra desde diferentes puntos de vista. De acuerdo con las predicciones de los modelos climáticos globales, existe una cierta tendencia hacia la sequía, y consecuentemente una amenaza de desertificación, en la zona más vulnerable de Europa que es la mediterránea. La Unión Europea consideró apropiado que las actividades se concentraran primeramente en esta región. Como primer paso y para reducir la complejidad del problema, se eligió una zona experimental orográficamente sencilla, a una escala compatible

con los modelos globales, y relativamente homogénea para realizar la validación de algoritmos de teledetección. Esta zona se encontró fácilmente en Castilla-La Mancha.

La coordinación internacional del proyecto fue encomendada al Profesor H.-J. Bolle (Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin), y la coordinación del grupo español al Profesor J. Meliá (Unidad de Investigación de Teledetección, Universitat de València).

Se está estableciendo la cooperación con otros programas de la Unión Europea tales como MEDALUS, HAPEX-SAHEL, etc para ir construyendo en un futuro próximo una red de centros de investigación competentes a nivel europeo. En una perspectiva a más largo plazo, los resultados obtenidos para las regiones semiáridas de la Europa Meridional deben compararse con los que se obtengan en las regiones Septentrionales, las cuales se verán afectadas de un modo diferente por el cambio climático.

Este trabajo proporciona una descripción del diseño experimental y algunos resultados de carácter general. Se enmarca la contribución de la Unidad de Teledetección de la Universitat de València en aquellos aspectos que se desarrollaron de acuerdo con sus objetivos, detallando alguno de los trabajos y se refieren los resultados que se presentan en otras comunicaciones a este Congreso donde puede encontrarse una información más detallada sobre ellos. De acuerdo con esto, el trabajo de dicha Unidad se centró en las siguientes líneas de investigación:

- Caracterización de las condiciones bajo las que se desarrolló la fase intensiva del experimento de campo y la representatividad de este período con relación a un estudio climatológico.
- Caracterización espectral de la cobertura vegetal mediante radiometría de campo.
- Estimación de la radiación solar neta a partir de datos primarios de METEOSAT.
- Análisis del cambio de escala desde medidas puntuales a datos de satélite.
- Desarrollo de modelos para la corrección atmosférica y corrección por emisividad de datos de satélite en bandas térmicas.
- Análisis de la evapotranspiración de los cultivos principales por medio de la teledetección.

Experimento piloto en Castilla-La Mancha en junio de 1991

El experimento de campo, cuya fase intensiva tuvo lugar en junio de 1991, consiguió reunir la experiencia de 30 centros de investigación patrocinados por el programa EPOCH. Aunque en principio la campaña de medidas de 1991 se consideró un experimento piloto, ésta contenía todos los elementos necesarios para considerarla

como una contribución europea a los estudios de Cambio Global y como un ejercicio de cooperación multinacional dentro de un trabajo interdisciplinar en gran escala en Europa. De hecho, EFEDA es una contribución europea al Global Change Project "Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle" del International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) y al World Climate Research Programme (WCRP).

Los objetivos fundamentales del experimento piloto de 1991 fueron: a) la determinación experimental y modelización de promediados espaciales de los flujos de energía y de vapor de agua que relacionan la superficie con la atmósfera, b) la determinación del papel que la vegetación juega en estos procesos bajo condiciones relativamente secas, y c) la investigación de los cambios a los que este acoplamiento se expone si se pasa de condiciones de regadío a secano.

La participación de un gran número de grupos y de contribuciones multidisciplinares son esenciales para poder obtener promedios espaciales de los parámetros de interés. En lugar de instalar tantos emplazamientos de medida como fueran necesarios para poder integrar todas las heterogeneidades del paisaje, se eligieron tres estaciones base que de algún modo fueran representativas de las diferentes características de la región completa. Así, la estación de Barrax caracterizaría una zona agrícola fundamentalmente de regadío, la de Tomelloso una zona agrícola fundamentalmente de secano y la de Rada de Haro sería representativa de una zona de uso marginal no agrícola, fundamentalmente con vegetación natural. Cada una de estas zonas ocupaba una extensión de 10x10 km². Los diferentes grupos se distribuían en estas zonas, pudiendo así estimar la influencia de las heterogeneidades que pudieran ocurrir dentro del área correspondiente a cada estación, a una escala de uno o dos kilómetros, tamaño medio de los pixels de NOAA. Las tres zonas seleccionadas son efectivamente representativas de zonas más extensas en la región y el trabajo básico es promediar los resultados hasta cubrir una zona de 100x100 km² con ayuda de observaciones de satélite. La Universidad de Castilla-La Mancha realizó una formidable tarea de coordinación e infraestructura para los diferentes grupos.

Además de los datos en el propio suelo y los datos de satélite, se contó con las medidas realizadas desde aviones que recorrían la región midiendo parámetros atmosféricos (necesarios para la corrección atmosférica de los datos de satélite), flujos de calor (medidas comparables a las realizadas desde el suelo que permitan una buena integración sobre toda la zona) y parámetros de teledetección utilizando sensores similares a los de algunos satélites. El Instituto Nacional de Meteorología, junto con algún otro centro europeo, se encargó de realizar frecuentes radiosondeos a diferentes niveles en las tres zonas de estudio, que pueden utilizarse para determinar también los flujos de advección que juegan un papel importante bajo condiciones de secano.

Para la validación de los datos de satélite y de los métodos utilizados en su procesamiento, se realizaron también medidas móviles de magnitudes como la transmisividad espectral de la atmósfera, el vapor de agua precipitable a partir de los radiosondeos, la reflectividad espectral del suelo y de la vegetación, el albedo espectral sobre los tipos fundamentales de superficies, la temperatura radiométrica de la superficie, la emisividad para interpretar la temperatura radiativa en términos de temperaturas termodinámicas, etc.

Los resultados experimentales que finalmente se obtengan deberán entonces estudiarse en relación con otros datos meteorológicos y climatológicos retrospectivos de fondo para la Península Ibérica y así averiguar hasta qué punto la fase experimental se ha realizado bajo condiciones climatológicas medias o de carácter extraordinario.

La fase intensiva del experimento de campo siempre se acompañó de trabajos de modelización a diferentes escalas, desde SVATs (Soil-Vegetation- Atmosphere Transfer), monodimensionales hasta Modelos de Circulación General en tres dimensiones.

Los primeros resultados de carácter preliminar fueron objeto del primer EFEDA Annual Report para la Unión Europea (diciembre de 1991) y el tema central del EFEDA Science Meeting en el DLR, Physik der Atmosphaere, Oberpfaffenhofen (Germany), 12-14 febrero, 1992. Del 18 al 21 de noviembre de 1992 tuvo lugar un nuevo Meeting of the EFEDA Project Teams en METEO-FRANCE, en Toulouse y en agosto de 1993, se entregó el Final Report a la Unión Europea (Bolle and Streckenbach, 1993).

Contribución de la unidad de investigación de teledetección de la Universitat de València al proyecto EFEDA

El componente de Teledetección del Proyecto EFEDA incluye la validación y aplicación de algoritmos mediante los que pueda inferirse información sobre las características de la superficie terrestre a partir de las medidas realizadas desde el espacio. En síntesis, se requiere que sea posible interrelacionar cuantitativamente los datos obtenidos en diferentes zonas y en periodos diferentes, relacionar estas magnitudes con las medidas realizadas en el suelo para caracterizar el estado de la superficie y obtener series temporales de datos que permitan distinguir cambios a largo plazo a partir de la variabilidad de la señal a corto plazo. Esta metodología incluye la solución de problemas que se plantean por la calibración absoluta insuficiente de los sensores a bordo de los satélites, su degradación con el tiempo, la interferencia de la atmósfera y la dependencia de la señal con la geometría de observación. La utilización de medidas multitemporales elimina la necesidad de imágenes de alta resolución en los estudios globales. Este tipo de imágenes son menos frecuentes bajo condiciones

de cielo despejado en la mayor parte de las zonas del planeta, y contienen una cantidad ingente de datos a analizar. La limitación consecucnte a la resolución media de NOAA inmediatamente ocasiona problemas adicionales debidos a la mezcla de diferentes tipos de superficie presentes en los pixels de tamaño 1.2 km x 1.2 km. Para estudios globales, la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera se estudia a las escalas de los modelos globales (10^4 - 10^5 km²), y para establecer y validar las relaciones entre las características de la superficie y los datos de teledetección, es necesario acudir a medidas de control que se realizan directamente sobre la propia superficie.

Radiometría de Campo

El primer paso en la caracterización de una zona particular para interpretar los datos de satélite comienza con las medidas en el suelo y el análisis de los factores que influyen en los procesos a ese nivel.

La Unidad de Investigación de Teledetección de la Universitat de València realizó una campaña de radiometría de campo en las tres zonas de Barrax, Rada de Haro y Tomelloso, para caracterizar espectralmente los principales usos del suelo, analizar los factores que determinan los valores de reflectividad y estudiar su influencia en la intercomparación de reflectividades obtenidas en diferentes zonas en periodos diferentes. El trabajo se realizó en el marco de un estudio de seguimiento midiendo las reflectividades espectrales de los principales cultivos, según su ciclo fenológico, y cada 16 días aproximadamente, casi simultáneamente con el paso de LANDSAT 5. A la vez, en colaboración con la Universidad de Castilla-La Mancha, se medían diferentes parámetros agronómicos para estudiar la correlación entre el índice de vegetación (NDVI) y el índice de área foliar (LAI) y la biomasa. Algunas parcelas asociadas a cultivos de regadío en la zona de Barrax mostraban el comportamiento espectral típico de la vegetación verde. Otras parcelas asociadas a cultivos de secano en la zona de Tomelloso no mostraban en su respuesta espectral la absorción típica de la clorofila, indicando así la presencia de una vegetación más amarillenta y una mayor contribución de la respuesta del suelo. También se realizaron medidas espectrales en la zona de Rada de Haro, principalmente sobre superficies de vegetación natural. El detalle de estos trabajos se presenta en la comunicación de Gilabert y Meliá (1994), en este mismo libro. También se seleccionó una parcela de suelo desnudo muy homogénea, en la zona de Barrax, para tomar medidas de referencia para los datos de satélite y estimar los efectos atmosféricos que se realizaron justo a la hora de paso del satélite LANDSAT 5 los días 12 y 28 de junio y a la hora de paso del avión ER-2 de NASA, equipado con los sensores TMS y AVIRIS.

También se realizaron medidas de emisividad y transectos de temperatura en la zona de Barrax para poder validar los métodos de campo desarrollados para la deter-

minación de la emisividad y para la estimación de los efectos atmosféricos. Con estas medidas también se pretendía la definición de parámetros efectivos de emisividad y temperatura a la escala de NOAA. Las medidas de emisividad se realizaron fundamentalmente sobre cultivos de maíz y cebada, tanto de secano como de regadío. Con estas medidas se han podido obtener mapas de emisividades a las escalas de LANDSAT y NOAA (Coll et al., 1994).

Evaluación de Datos de Satélite en el Espectro Solar

La intercomparación de medidas de diferentes sistemas de teledetección y la intercomparación con medidas en el suelo identificó tres tipos de problemas principales en la "portabilidad" de los métodos de teledetección, y éstos se han tratado en el contexto de EFEDA: a) La calibración de sensores no está suficientemente documentada ni disponible con rapidez para uso operacional. Esto motivó la realización de esfuerzos de calibración durante la propia campaña de campo. b) Los métodos de corrección atmosférica sin información sobre los aerosoles es todavía un problema importante. c) La fuerte y variable dependencia de la reflectividad angular con las condiciones de iluminación y la geometría de observación de un ecosistema a otro, requiere una investigación detallada para los varios tipos de superficie. Más aún, el albedo, necesario en la estimación de balances de radiación, no está propiamente definido debido a su fuerte dependencia con el ángulo solar zenital y con la nubosidad.

Respecto del problema de la calibración y degradación de los sensores, existen dos fórmulas diferentes de extrapolación para AVHRR que son las de Kaufman et al. (1992) y Che y Price (1992). Puesto que el proceso de calibración implica realizar las mismas correcciones mencionadas y discutidas aquí, es difícil determinar la precisión de estas calibraciones. Para junio de 1991, los dos coeficientes de calibrado son diferentes en un 8% para el canal 2 y son iguales para el canal 1. Con relación a LANDSAT-TM, Brockmann (1992) opina que los datos distribuidos por ESA y que son los que se utilizan en EFEDA, no vienen corregidos respecto a la degradación del sensor y sugiere que los datos TM pueden ser erróneos de un -7% a un -10%. Estas correcciones acercarían los datos TM-3 a los del AVHRR-1 e igualmente aumentarían los de TM-4 y AVHRR-2.

El remuestreo de los datos espectrales basados en medidas de campo en un espacio multiespectral viene definido por los datos particulares de teledetección de cada sensor. Así, como las bandas del LANDSAT TM son relativamente anchas, las funciones de filtro que imitan la respuesta del TM en cada banda deben convolucionarse con los datos de radiometría del suelo. Con relación al sensor AVIRIS y debido a su pequeña anchura de banda, se pueden aplicar filtros gaussianos centrados en cada banda del sensor a los datos de radiometría. La aplicación de estas técnicas permite

que los datos espectroscópicos de campo puedan expresarse en un espacio multiespectral muy similar al definido por los sensores TM y AVIRIS.

En la intercomparación entre LANDSAT y NOAA, afortunadamente los canales AVHRR 1 y 2 se corresponden bastante bien con los TM 3 y 4, respectivamente. Sin embargo, sobre suelo desnudo y debido a la gran anchura de la media banda del AVHRR 1, sus medidas pueden ser inferiores a las del TM 3 y sobre vegetación densa puede ocurrir lo contrario. La reflectividad del AVHRR 2 puede resultar subestimada sobre vegetación cuando se compara con TM 4 (Billing et al., 1993).

Con relación a la corrección de los efectos atmosféricos, los procedimientos habituales se basan en la utilización de los códigos de transferencia radiativa LOW-TRAN-7 ó 5S de Tarré (1990). Pero se necesita información instantánea sobre el campo de aerosoles, la cual es en general muy difícil de conseguir. Los modelos de aerosoles pueden ajustarse internamente dentro del código mediante la selección de su tipo y la estimación de la visibilidad. La Unidad de Investigación de Teledetección normalmente ha utilizado los modelos de atmósferas normales y de aerosoles incluidos en los códigos mencionados. Se ha podido disponer de datos de radiosondeos realizados por otros grupos participantes en el proyecto para estimar la absorción por el vapor de agua precipitable en la atmósfera.

También se abordó el problema de la conversión espectral de banda estrecha a banda ancha que es una de las correcciones que debe aplicarse a las radiancias observadas por los satélites para la estimación del albedo en superficie, si las medidas que se utilizan son de banda estrecha, como es generalmente el caso. El factor de corrección tiene una cierta imprecisión en sí mismo, ya que dicha conversión depende fundamentalmente de la variación espectral de la reflectividad de la superficie, la cual a su vez depende de la vegetación y del tipo de superficie. La utilización de un simple canal espectral de banda estrecha para obtener el albedo en banda ancha proporciona buenos resultados si se aplica a superficies homogéneas. El albedo también se obtiene a partir de la combinación lineal de las respuestas espectrales en más de un canal. El problema es entonces encontrar los factores de peso que deben asignarse a cada banda para hacer dicha transformación.

Con el código 5S de Tarré (1990) se ha simulado la observación de diferentes satélites dentro del espectro solar, controlando un amplio número de condiciones referentes a la atmósfera y a la geometría de iluminación y de observación. Se ha supuesto una atmósfera normal de latitudes medias en verano y un modelo continental de aerosoles. La concentración de estos aerosoles se varió para obtener un amplio intervalo de visibilidades comunes (9, 13, 17 y 23 km). Para las condiciones geométricas, se seleccionaron las direcciones representativas para cada uno de los satélites.

NOAA-11 y METEOSAT, suponiendo constante la dirección de iluminación por el sol, correspondiente al 12 de junio de 1991 (uno de los "Golden Days" de EFEDA), alrededor de las 14:30 h GMT sobre un píxel centrado en la Península Ibérica. La dirección de observación para cada píxel observado por METEOSAT se mantuvo constante y la de NOAA-11 se cambió entre -50° y $+50^\circ$ para el ángulo zenital del satélite y entre 105° y 82° para su ángulo azimutal.

Se emplearon algunos de los espectros representativos obtenidos durante la campaña (abril a junio de 1991), correspondientes a los tipos de superficies más característicos de la zona de EFEDA, para realizar una correlación multivariante entre las bandas estrechas de los canales 1 y 2 de AVHRR y el VIS en banda ancha de METEOSAT. Así se incorporaron 20 espectros reales a la simulación teórica, haciéndola más semejante a las condiciones naturales, obteniendo una serie de datos de albedos planetarios y superficiales tanto en banda estrecha (AVHRR 1 y 2) como en banda ancha (METEOSAT VIS). También se obtuvo por simulación el albedo en una banda ancha rectangular entre 0.3 y 2.5 μm . Los albedos se obtuvieron mediante la convolución de los flujos incidentes y emergentes con las funciones de filtro de cada uno de los sensores antes de calcular el cociente de ambas magnitudes. En este estudio no se tuvieron en cuenta los efectos resultantes de la diferente resolución espacial de cada sensor y sólo se consideraron los efectos espectrales, ya que se pretendía analizar la relación entre las señales de los diferentes sensores del AVHRR y METEOSAT durante un paso prácticamente coincidente sobre la Península Ibérica alrededor de las 14:30 h GMT. Los detalles y discusión de los resultados de esta investigación se pueden encontrar en Valiente et al. (1993) y ahora sólo se proporciona una visión esquemática de las averiguaciones principales.

Se realizó una regresión multilineal entre los canales 1 y 2 en banda estrecha de NOAA y el VIS en banda ancha de METEOSAT utilizando los datos de la simulación. Esto permite encontrar una combinación lineal entre los albedos del AVHRR 1 y 2 para estimar la señal que mediría METEOSAT, independientemente del tipo de superficie. Aplicada al techo de la atmósfera, la combinación lineal es

$$\alpha_{\text{MET}} = 0.440 \alpha_{\text{AVHRR-1}} + 0.529 \alpha_{\text{AVHRR-2}} \quad (1a)$$
$$(R^2 = 0.983 \text{ y error standard} = 4.5\%)$$

La inclusión de una constante sólo mejora la correlación en un 1%:

$$\alpha_{\text{MET}} = 0.425 \alpha_{\text{AVHRR-1}} + 0.474 \alpha_{\text{AVHRR-2}} + 0.018 \quad (1b)$$
$$(R^2 = 0.989 \text{ y error standard} = 3.5\%)$$

El efecto de la atmósfera puede eliminarse correlacionando los albedos de NOAA y METEOSAT a nivel del suelo. El resultado es entonces

$$\alpha_{\text{MET}} = 0.459 \alpha_{\text{AVHRR-1}} + 0.481 \alpha_{\text{AVHRR-2}} \quad (2)$$

($R^2 = 0.999$ y error standard = 1.2%)

que muestra una correlación casi perfecta.

Respecto a la simulación a nivel del suelo del albedo en banda ancha (0.3 - 2.5 μm), se alcanza mayor precisión con ambos canales de NOAA que con el de METEOSAT. Esto se demuestra comprobando la posibilidad de cada uno, con su respectiva combinación de filtros, para representar una banda ancha rectangular (0.3 - 2.5 μm), sin considerar efectos atmosféricos. La eq (3) se refiere a METEOSAT y la (4) a NOAA-11.

$$\alpha_{\text{BROAD-BAND}} = 0.974 \alpha_{\text{MET}} \quad (3)$$

($R^2 = 0.938$ y error standard = 7.3%)

$$\alpha_{\text{BROAD-BAND}} = 0.545 \alpha_{\text{AVHRR-1}} + 0.320 \alpha_{\text{AVHRR-2}} + 0.035 \quad (4)$$

($R^2 = 0.982$ y error standard = 4.4%)

Es preferible así utilizar datos de NOAA en lugar de METEOSAT para calcular albedos de superficie en banda ancha. No se ha comprobado, sin embargo, si la corrección atmosférica previa de las imágenes contendría una mayor fuente de error en el caso de NOAA, fundamentalmente debido a los ángulos grandes de observación.

Los resultados de esta correlación se han aplicado a imágenes reales de los satélites, en concreto las correspondientes al 12 de junio de 1991, aproximadamente a las 14:45 h GMT para NOAA-11 y 15:00 h GMT para METEOSAT-4, sobre la Península Ibérica, realizando la conversión espectral obtenida mediante la simulación para los albedos en el techo de la atmósfera. Las tres imágenes fueron corregidas geométricamente a una proyección polar estereográfica y la de METEOSAT fue remuestreada utilizando un ajuste polinómico con puntos de control y transformada a una proyección en latitud y longitud mediante una convolución cúbica. El tamaño del pixel de METEOSAT se mejoró hasta la resolución de NOAA. El resultado final de todas estas correcciones espaciales fueron tres imágenes (AVHRR 1 y 2 y METEOSAT) perfectamente superponibles sobre una proyección polar estereográfica. Se aplicó la eq (1b) a los albedos del AVHRR 1 y 2 para realizar la conversión espectral y el re-

sultado se muestra en el diagrama de la Figura 1 frente al albedo determinado a partir de la imagen de METEOSAT. En la nube de puntos de la figura se distinguen tres grupos. El cluster más cercano al vértice corresponde a superficies de agua (alrededor del 35% de los pixels), el más cercano al centro corresponde a superficies terrestres (alrededor del 55% del total), y los puntos en el halo coinciden con movimientos de nubes de una imagen a otra (alrededor del 10%). En la Figura 2, donde se eliminaron ahora las superficies de agua y nubes, los diferentes colores representan la desviación entre el albedo real de METEOSAT y el que puede predecirse a través de los canales AVHRR 1 y 2. Los resultados de esta comparación muestran un mayor error en la estimación de METEOSAT debido a la fuerte influencia de la reflectividad anisotrópica de la atmósfera. La comparación de las imágenes pone también de manifiesto que los albedos determinados a partir de NOAA aumentan de oeste a este a lo largo de la órbita de paso del satélite, señalada también en dicha figura. Una parametrización de este comportamiento de la atmósfera podría ser útil en estudios futuros para obtener una mejor estimación de los albedos de NOAA. Si esto pudiera conseguirse, a través de los datos de este satélite se obtendría una mejor estimación del albedo en banda ancha que con los datos de METEOSAT. Más aún, si el intervalo de variación de los ángulos de observación de NOAA no es demasiado grande, la transformación espectral utilizando la ec (2) podría proporcionar la estimación del albedo dentro de un error aceptable.

Los resultados de este trabajo se emplearon en el contexto de la estimación del balance de la radiación solar neta para algunos de los Golden Days del Proyecto EFEDA cuyo detalle se proporciona en Núñez et al., (1994) en este mismo libro de comunicaciones.

Integración de los Datos de Teledetección de Diversos Sensores para el Análisis del Cambio de Escala Espacial

La comparación entre medidas en el suelo (a una escala de metros) con las de satélite (a escala de kilómetros) implica la consideración del problema del cambio de escala, tanto para las medidas particulares como para los modelos que las relacionan. El problema es más complicado en este último caso porque las relaciones matemáticas entre las variables a nivel del suelo no son las mismas que al nivel de la baja resolución de los satélites y los valores promedio no dan los mismos resultados cuando se aplican a relaciones originales o a valores medios.

El problema del cambio de escala desde las medidas en el suelo hasta la baja resolución del satélite se enfocó utilizando datos de LANDSAT, de alta resolución, como paso intermedio en esa transición e integrando estos últimos en los del AVHRR. La integración de ambas series de datos permite entender el significado

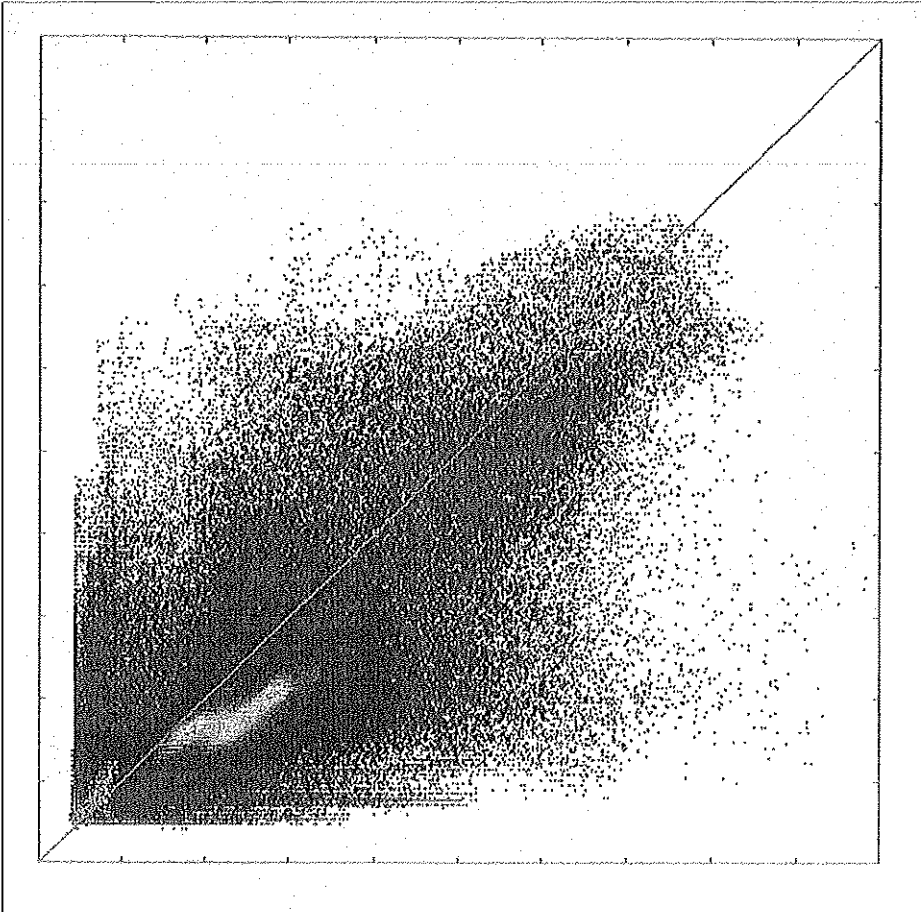


Figura 1

Albedo en el techo de la atmósfera evaluado mediante la combinación lineal de los canales AVHRR 1 y 2 de acuerdo con la ecuación (1b) del texto frente al estimado directamente a partir de los datos del canal VIS de METEOSAT. (A. 93)

de las medidas de baja resolución en términos de la variabilidad espacial que se obtiene entre los datos de alta resolución. También se ha estudiado el problema de la definición de la varianza dentro del pixel del AVHRR, obteniendo valores medios para cada pixel y mapas de varianza a partir de los datos de alta resolución degradados espacialmente (Moreno y Meliá, 1992). El detalle de este trabajo se encuentra en la comunicación de Meliá y Moreno (1994), también en este mismo libro de comunicaciones.



Figura 2

Diferencia entre el albedo real medido a partir de los datos de METEOSAT y el que puede predecirse a partir de la combinación de AVHRR 1 y 2. (A. 94)

Estimación de la evapotranspiración en la zona de Barrax

El detalle de este trabajo se encuentra en la comunicación de Artigao et al., (1994), en este mismo libro de comunicaciones.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Unión Europea la financiación de este Proyecto. En particular J.C. Fortea es becario del mismo y J.A. Valiente lo fue durante el curso 91/92.

Bibliografía

Artigao M.M., Caselles V. y Hurtado E.: 1994. Obtención de la evapotranspiración en la zona de Barrax (Albacete) mediante combinación de imágenes LANDSAT TM y NOAA-AVHRR. V Reunión Científica de la Asoc. Española de Teledetección, Las Palmas de Gran Canaria, 10-12 nov. 1993

- Billing H., Bolle H.-J., Eckardt M., Fell F., Koslowsky D., Langer I. and Tonn W.:** 1993. Contribution of the Free University of Berlin. Ch. 7.3.2 in *EFEDA Final Report*. Ed. by H.-J. Bolle and B. Streckenbach. August 1993, Berlin.
- Bolle H.-J. et al.:** 1993. EFEDA: European field experiment in a desertification-threatened area. *Ann. Geophysicae* 11, 173-189.
- Bolle H.-J., André, J.C. and Shuttleworth, W.J.:** 1989. *ECHIVAL. Proposal for a European International Project on Climatic and Hydrological Interactions between Vegetation, Atmosphere and Land-surfaces*.
- Bolle H.-J. and Streckenbach B.:** (Editors) 1993. *EFEDA Final Report*, August 1993, Berlin.
- Bolle, H.-J. and Shuttleworth, W.J.:** 1989. *Proposal for the ECHIVAL Field Experiment in a Desertification-threatened Area (EFEDA)*.
- Coll C., Caselles V., Valor E., Badenas C. y Rubio, E.:** 1994. Resultados experimentales obtenidos en el dominio del infrarrojo térmico dentro de los proyectos EFEDA y HAPEX-SAHHEL. *V Reunión Científica de la Asoc. Española de Teledetección*, Las Palmas de Gran Canaria, 10-12 nov. 1993.
- Gilabert, M.A. and Meliá, J.:** 1994. Seguimiento del maíz por radiometría de campo en la zona experimental EFEDA. El NDVI como indicador del crecimiento. *V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*, Las Palmas de Gran Canaria, 10 - 12 nov. 1993.
- Meliá, J. y Moreno, J.:** 1994. El problema de la "Escala Espacial" en los datos de Teledetección: Metodología aplicada en el Proyecto EFEDA. *V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*, Las Palmas de Gran Canaria, 10 - 12 nov. 1993.
- Moreno, J. and Meliá, J.:** 1992. About the problem of scaling from ground measurements to low resolution satellite data. *Proc. IGARSS'92 Symp*, Houston, Texas, May 1992, vol. II, pp. 1640-1642.
- Núñez M., Valiente J.A., Forkea J.C., López-Baeza E. y Moreno J.:** 1994. Estimación del balance de radiación en superficie mediante datos de satélite. *V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*, Las Palmas de Gran Canaria, 10 - 12 nov. 1993.
- Smagorinsky, J.:** 1974. *Weather and Climate Modification*. W.N. Hess (ed.) 633-686. John Wiley.
- Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J.J., Perboos J. and Deschamps P.Y.:** 1990. Technical note. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *Int. J. Remote Sensing*, 11, no. 4, 659-668.
- Valiente J.A., Nunez M., Lopez-Baeza E. and Moreno J.:** 1993. Narrow-band to broad-band conversion for METEOSAT-visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and -2 channels. (Submitted).

