

# Aplicación de imágenes ASTER Y ETM+ para el estudio de la susceptibilidad a la erosión en una zona semiárida (SE España)

I. Carpintero-Salvo<sup>1</sup>, M. Chica-Olmo<sup>1</sup>, J.P. Rigol-Sánchez<sup>2</sup>, E. Pardo-Iguzquiza<sup>1</sup> y V. Rodríguez-Galiano<sup>1</sup>

irene.carpintero@gmail.com

(1) Universidad de Granada. Dpto. de Geodinámica /CEAMA, Avda/ Fuentenueva s/n, 18071 Granada

(2) Universidad de Jaén. Dpto. de Geología/CEAMA, Campus Universitario Las Lagunillas s/n, 23071 Jaén.

Recibido el 8 de noviembre de 2007, aceptado el 4 de febrero de 2008

## RESUMEN

La desertificación, junto con la erosión de los suelos, constituye uno de los principales problemas medioambientales y socioeconómicos del sureste español. Por ello, el desarrollo de trabajos que permitan determinar la susceptibilidad a la erosión del suelo de una región, deben ser considerados por parte de las administraciones de gran ayuda, en aquellos aspectos de toma de decisiones ligados a la planificación territorial. En este trabajo se desarrolla una metodología basada en teledetección, combinada con la utilización de espectrorradiometría de campo y herramientas SIG, para la determinación de la susceptibilidad a la erosión en un sector de la cuenca del río Almanzora (Almería). La metodología consta de una primera etapa de caracterización litológica y geomorfológica, en la que se han aplicado técnicas de realce y transformación de las imágenes de satélite, así como una clasificación digital basada en medidas de espectrorradiometría de campo. Con posterioridad, se ha establecido un conjunto de clases erosivas en función de criterios geológicos y geomorfológicos que, mediante clasificación digital supervisada, han proporcionado un mapa de clases erosivas. Por último, en función de la susceptibilidad a la erosión de cada clase, se elaboró un mapa de niveles erosivos, que ha permitido interpretar tanto la intensidad de los procesos erosivos como la distribución espacial de los mismos. Del análisis de estos resultados cartográficos, se deduce que la cuenca del río Almanzora presenta problemas de erosión importantes, que afectan a una extensa superficie, en la que los valores del índice de susceptibilidad obtenido son altos (niveles 1, 2 y 3).

**PALABRAS CLAVE:** Teledetección, espectrorradiometría, SAM, clasificación supervisada, erosión de suelos, Cuenca de Almanzora.

## ABSTRACT

Desertification, along with soil erosion, constitutes the main environmental and socioeconomic problem of the southeast of Spain. For that reason, research aiming on determination of regions susceptibility to erosion, can be helpful for land use decision making.

The methodology developed in this work, based on remote sensing, field radiometry and GIS, is orientated to determine the susceptibility to erosion in a sector of the Almanzora basin. The procedure consists on a first stage of lithological and geomorphological characterization applying techniques of enhancements and transformations of remote sensing images, and supported on image classification using measurements of field radiometry. On a second stage a series of erosive classes have been defined, and an image supervised classification procedure has been executed to obtain the map of erosive classes. Finally, based on the susceptibility to erosion of each class, the map of erosive levels has been elaborated. This tool easily makes possible to interpret the intensity of erosive processes and their spatial distribution, which follows geology patterns. From the analysis of this map, it is concluded that Almanzora basin has serious problems with soil erosion, with a large surface of high susceptibility (levels 1, 2 and 3).

**KEY WORDS:** Remote sensing, field radiometry, SAM, supervised classification, soil erosion, Almanzora basin.

## INTRODUCCIÓN

La erosión de los suelos es un problema medioambiental de primera magnitud, al que se enfrentan muchos países que, como España, cuentan con regiones semiáridas que sufren las consecuencias de los procesos de desertificación. La determinación de la susceptibilidad a la erosión, constituye un primer paso importante para una correcta gestión, por parte de las administraciones, del problema de la desertificación, con la finalidad de frenar o mitigar su avance. En la cuenca del río Almanzora, hay sectores en los que los problemas de erosión alcanzan niveles muy elevados, no sólo debido a las características litológicas y climatológicas de la región, sino también por cuestiones antrópicas de diversa índole, entre las que destaca el cambio en el uso del suelo y, particularmente, el abandono de los campos de cultivo. La consecuencia es que, cada vez más, los suelos se encuentran desnudos la mayor parte del año, favoreciendo el arrastre de los materiales superficiales por las aguas de escorrentía, notablemente durante los episodios de lluvias torrenciales característicos de esta región.

La teledetección es una herramienta de demostrada utilidad en los estudios ambientales relacionados con suelos, vegetación, litología, geomorfología, etc. La extracción de información de las imágenes a través del análisis digital puede mejorarse si se incluyen medidas de espectrorradiometría de campo, dado que proporcionan información de los materiales tal y como se encuentran "in situ", en su estado de degradación específico. En este trabajo se propone una metodología de uso conjunto de técnicas de teledetección, espectrorradiometría de campo e integración de datos en un SIG, para la determinación de la susceptibilidad a la erosión de la región de estudio. Los datos utilizados para este trabajo son de diversa naturaleza, desde cartografía de base a cartografía temática, imágenes de satélite de los sensores Landsat ETM+ y ASTER, y datos de espectrorradiometría de campo. Para la integración y análisis espacial de la información se ha implementado una base de datos espacial en un SIG.

Las técnicas de teledetección se han orientado, en primer lugar, a la aplicación de realces y transformaciones de las imágenes, para la caracterización litológica y geomorfológica de la región. Esta caracterización se ha completado con los resultados de la clasificación digital de la imagen ETM+, con el algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM) (Kruse,

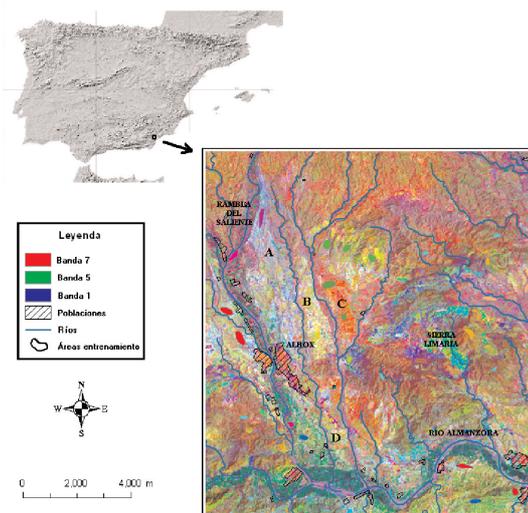
1993), partiendo de los datos de espectrorradiometría de campo.

El análisis de los resultados de esta primera etapa, junto con la caracterización en campo de los diversos procesos erosivos activos, ha permitido establecer para el área de estudio una serie de clases erosivas, así como la localización de los sectores más característicos en los que se da cada clase. Esta etapa se ha completado con la aplicación de una clasificación digital supervisada de la imagen ASTER, con la finalidad de obtener un mapa de clases erosivas. La reclasificación de este mapa en 7 niveles (niveles erosivos), se ha llevado a cabo en función de la susceptibilidad a la erosión de cada clase y teniendo en cuenta la intensidad y frecuencia de los procesos erosivos activos.

Como resultado final de este trabajo, se ha obtenido un mapa de susceptibilidad a la erosión, que debe constituir una base de información de especial utilidad para la toma de decisiones en la gestión y ordenación territorial del área de estudio.

## AREA DE ESTUDIO Y DATOS

La zona de estudio se sitúa en Almería, en un sector de la cuenca del río Almanzora (figura 1). Lo más característico de la región es su densa red de drenaje subparalela, que discurre de norte a sur, de forma perpendicular al río Almanzora, cuyas aguas fluyen en el sentido este a oeste.



**Figura 1.** Localización del área de estudio y composición falso color RGB 751 de la imagen ETM+ de un pequeño sector en el que destacan los materiales de pie de monte que afloran al norte de Albox, realizada mediante decorrelation stretch.

En cuanto a la geología que aflora en la zona, hay que distinguir por una parte los relieves localizados al norte (Sierra de las Estancias y del Madroño) y al centro de la región (Sierra de Limaria), y por otra parte la cuenca sedimentaria que se desarrolla entre ellos (Cuenca de Huércal-Overa). Los relieves son principalmente del Triásico, esencialmente de los complejos Alpujarride y Nevado-Filábride, con materiales diversos como filitas, metaargilitas, cuarcitas, yesos, esquistos con granates y dolomías. Sin embargo, la cuenca se caracteriza por la presencia de materiales de relleno sedimentario procedentes de la erosión de los relieves indicados y de otros sedimentos neógenos. Se distingue entre materiales del Mioceno Superior (Tortonense) formados por conglomerados y brechas rojas; conglomerados, arenas y limos grises; margas y arenas amarillas o abigarradas; margas amarillas con areniscas; y carbonatos arrecifales. Y por otra parte, materiales del Plioceno y Cuaternario, principalmente conglomerados y limos grises y depósitos aluviales (Guerra-Merchán, 1992).

La climatología de la región se caracteriza por ser mediterránea, semiárida, con escasas precipitaciones invernales o equinocciales (alrededor de 280mm/año), con frecuencia caídas de forma torrencial durante pocos días e, incluso, horas (Chica-Olmo, 1992).

En cuanto a la vegetación, destacar la existencia de cultivos de regadío, principalmente de cítricos, localizados en los abanicos aluviales y llanuras de inundación de los cauces principales; y cultivos de secano, almendros y olivos, en las zonas de poca o media pendiente, que se encuentran en su gran mayoría abandonados. Respecto a la vegetación natural, destacar su escasa presencia, que está íntimamente relacionada con la topografía y litología. Como consecuencia de su adaptación a la climatología, la vegetación es de tipo xerófilo, predominando el herbazal o el matorral de tomillar, espartal, etc.

Como se puede deducir de esta descripción, la geomorfología del área de estudio está estrechamente ligada a los escasos episodios de intensa precipitación, que determinan diferentes procesos erosivos en función del material, la cobertura vegetal y la pendiente. Estos procesos erosivos suelen ser de gran intensidad, dando paso a fenómenos de erosión en surcos, en lámina, pipings, acarcavamientos, movimientos en masa y morfologías tipo badlands.

En cuanto a los datos utilizados en este trabajo, se dividen en cartografía de base, cartografía temática, imágenes de satélite y datos de campo. Como infor-

mación cartográfica de base se ha utilizado el mapa topográfico a escala 1:10.000, además de ortofotografías y de un modelo digital de terreno. La cartografía temática utilizada está compuesta por los mapas geológico, geomorfológico y de procesos erosivos elaborados por Chica-Olmo, 1992 y el mapa geomorfológico y geológico del cuaternario de la cuenca de Huércal-Overa elaborado por García-Meléndez, 2000.

Además, se han utilizado una imagen Landsat ETM+ del 8 de Agosto del 2000 y una ASTER del 9 de Julio de 2004. Por último, también se llevó a cabo un muestreo de espectrorradiometría de campo, con un radiómetro GER2600. Este radiómetro consta de 640 canales, con una resolución espectral de 1,5 nm desde 350 a 1050 nm y de 11,5 nm desde 1050 a 2500 nm. El muestreo estuvo acompañado de una caracterización visual de los procesos erosivos in situ y su registro en fotografía digital.

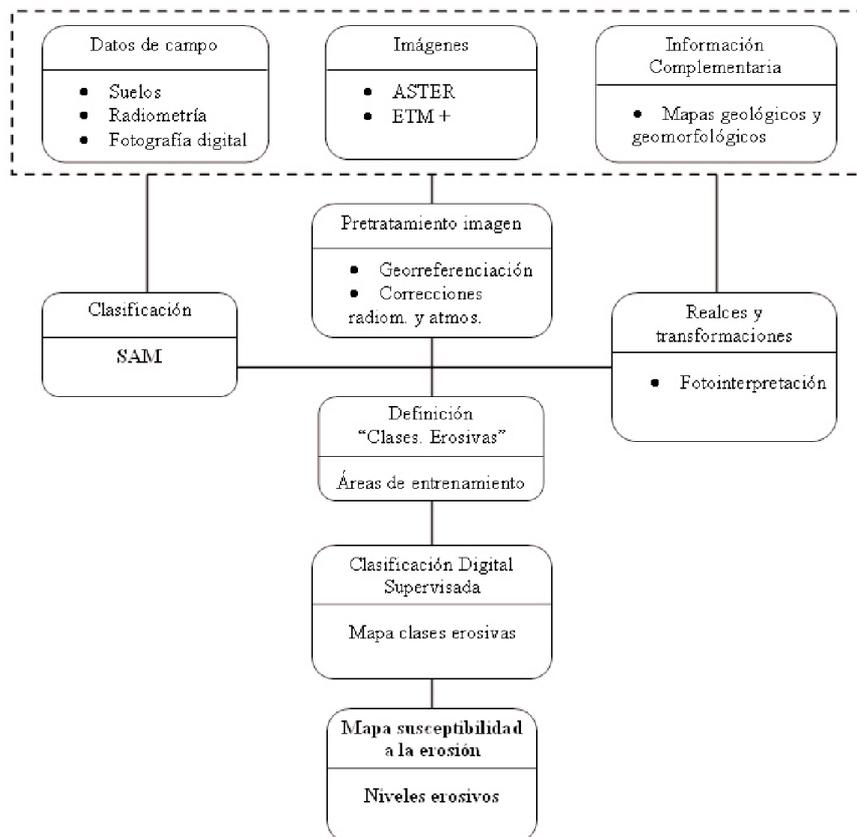
## METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en este trabajo sigue de forma resumida el esquema de la figura 2. Así, cabe destacar, una etapa inicial de caracterización litológica y geomorfológica del área de estudio, en la que se ha integrado la información procedente de la cartografía temática, las imágenes de satélite y la espectrorradiometría de campo; y una etapa posterior de aplicación de la clasificación digital supervisada a una de las imágenes de satélite. Por último, se ha procedido al análisis de los resultados y reagrupación de las clases erosivas en función de la susceptibilidad a la erosión, obteniéndose como resultado final un mapa de susceptibilidad a la erosión.

### Caracterización litológica y geomorfológica del área de estudio

La etapa de preparación de los datos incluye la digitalización de la mayoría de los mapas anteriormente nombrados, dado que estaban en formato analógico, acompañada de la introducción en la geodatabase del SIG de los datos de espectrorradiometría de campo y fotografía digital de los puntos de muestreo.

La imagen Landsat ETM+ se adquirió corregida geoméricamente (nivel 1G) y se convirtió a valores de radiancia y, seguidamente, de reflectancia (Markham, 1986). Para la corrección atmosférica de la imagen se aplicó el método de sustracción del objeto



**Figura 2.** Esquema de la metodología desarrollada en este trabajo.

oscuro (Chavez, 1988), utilizando el valor promedio, para cada una de las bandas, de una pequeña región de la imagen localizada en zona de mar.

La imagen ASTER se adquirió con nivel 2, corregida geométrica y radiométricamente. Esta imagen posee tres bandas en el visible e infrarrojo cercano (VNIR), con una resolución espacial de 15 m, y otras 6 bandas en el infrarrojo medio (SWIR), que tienen una resolución espacial de 30 m. Para poder trabajar con todas las bandas en el proceso de clasificación, se procedió al remuestreo de toda la imagen a una resolución espacial de 30m.

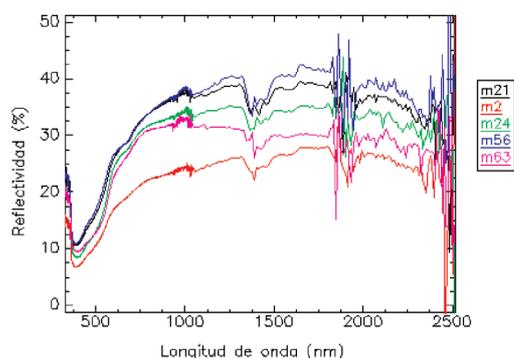
A efectos de evitar posibles errores en el tratamiento e interpretación de las imágenes, se definió una máscara binaria para suprimir ciertas áreas como poblaciones y campos de cultivo de regadío, a partir del mapa vectorial de poblaciones y del cálculo Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). En este caso, para la máscara del NDVI, se establecieron estadísticamente los valores de corte en 0,35 para la imagen ASTER y 0,3 para la imagen ETM+.

Un aspecto esencial de este trabajo ha radicado en la fotointerpretación de los aspectos litológicos y ge-

omorfológicos a partir de técnicas de realces y de transformaciones de las imágenes multispectrales. La transformación decorrelation stretch de la composición RGB 751 de la imagen ETM+ proporciona los mejores resultados, dado que permite una clara diferenciación de los materiales, lo que corrobora trabajos previos realizados por Vives, 1994 y 1995 (véase figura 1). En breve, esta transformación consiste en un análisis de componentes principales (ACP) de la composición RGB, seguida de un realce de las tres componentes y, por último, se invierte el ACP.

El realce espacial con filtros laplacianos de la imagen ASTER ha servido para estudiar, tanto los contactos entre los materiales como las características geométricas y densidad de la red de drenaje. Para la caracterización de los procesos erosivos activos en cada sector muestreado, se ha realizado un estudio de los datos de campo (espectrorradiometría, fotografía digital y caracterización visual). Algunas de las muestras de espectrorradiometría más representativas se exponen en la figura 3.

Los datos de espectrorradiometría de campo se han utilizado para la clasificación digital supervisada de



**Figura 3.** Espectros de campo de algunas muestras obtenidas.

la imagen ETM+, aplicando el algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM). Este algoritmo mide la similitud entre dos espectros (la medida de campo y la imagen de satélite) en función del ángulo que forman si son tratados como vectores, en un espacio de dimensión el número de bandas espectrales de la imagen ( $nb$ ) (Kruse, 1993). El cálculo consiste en la medida del arccoseno del producto escalar de los dos espectros ( $t$  y  $r$ ), como indica la siguiente fórmula:

$$\cos^{-1} \left( \frac{\vec{t} \cdot \vec{r}}{\|\vec{t}\| \cdot \|\vec{r}\|} \right)$$

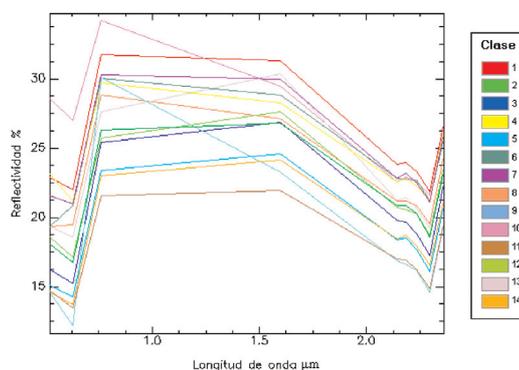
que también puede escribirse como:

$$\cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left( \sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{1/2}} \right)$$

Este método clasifica la imagen en función de los espectros de campo, asignando a cada píxel de la imagen, la clase (según espectro de campo) con la que forma un menor ángulo, siempre que el ángulo no sea mayor que un valor de tolerancia establecido por el usuario. En el caso de este trabajo, la tolerancia de ángulo establecida ha sido de 0,12rad.

### Clasificación digital supervisada

La definición de las clases erosivas y la elección de las áreas de entrenamiento que caracterizan cada clase, han sido los puntos más complejos de este trabajo. Para ello se ha integrado la información cartográfica temática anteriormente mencionada, junto



**Figura 4.** Firma espectral de las áreas de entrenamiento de las clases erosivas (Imagen ASTER).

con la información extraída a partir de las imágenes de satélite y la información del muestreo de campo. Para la definición de las clases se ha considerado que la litología de la cuenca sedimentaria presenta ciertas similitudes en su naturaleza, aunque puedan pertenecer a materiales de época distinta, por lo que tanto su respuesta espectral como su comportamiento frente a los procesos erosivos es parecida. Por otra parte, al producirse la erosión de los materiales más susceptibles, se provocan dos tipos de fenómenos que incrementan la confusión: erosión de los materiales superficiales y consecuentemente afloramiento de materiales subyacentes, o erosión de materiales subyacentes y caída en bloque de los materiales superficiales que son más resistentes a la erosión.

Para este trabajo se han definido 14 clases erosivas, determinadas en función de la litología y la geomorfología de la zona, como se señala en la tabla 1. Se observa que, en cuanto a la litología, todas las clases excepto la 1 y la 3 son diferentes. Esto obedece a que, normalmente, una determinada litología se comporta de forma similar frente a la acción de los fenómenos que producen erosión. Sin embargo, dada la alta susceptibilidad a la erosión de los materiales de las clases 1 y 3 (margas y margocalizas con intercalaciones de arenas y areniscas), la simple variación de la pendiente o la cobertura vegetal puede implicar una morfología del terreno diferente.

Igualmente, se observa que se dan rasgos geológicos similares en litologías diferentes. Esto es debido a que la zona de estudio se corresponde, como antes se comentó, con una cuenca sedimentaria, luego la mayoría de las formas del terreno van a estar asociadas a fenómenos de erosión hídrica, transporte y depósito de materiales detríticos. Sólo en el centro y norte de la región aparecen formas geomorfológicas características de relieves estructurales, ligadas a los

CLASE EROSIVA	LITOLOGÍA	GEOMORFOLOGÍA	NIVEL EROSIVO
1	22- Margas y margocalizas con intercalaciones de arenas y areniscas	Material Neógeno afectado por badlands y pípings	1
2	23- Arenas y lutitas con intercalaciones de conglomerados	Material Neógeno próximo a zonas afectadas por badlands y pípings	2
3	22- Margas y margocalizas con intercalaciones de arenas y areniscas	Material Neógeno próximo a zonas afectadas por badlands y pípings	2
4	24- Calizas, areniscas y margas	Abanico aluvial afectado por pípings	2
5	20- Conglomerados, gravas, arenas y arcillas del Mioceno	Material Neógeno	3
6	30- Conglomerados, gravas, arenas y arcillas del Cuaternario más recientes	Depósito en abanico aluvial II	4
7	29- Conglomerados, gravas, arenas y arcillas del Cuaternario	Depósito en abanico aluvial I y II	4
8	33- Coluvial	Reciente depósito aluvial indistinguible	5
9	37- Conglomerados, gravas y arenas	Terraza fluvial I	5
10	32- Aluvial	Río actual	7
11	15- Cuarzitas y esquistos con granates	Relieve estructural de materiales Paleozoicos y Triásicos	6
12	12, 16- Filitas, cuarzitas y calizas	Relieve estructural de materiales Paleozoicos y Triásicos	6
13	8- Yesos, brechas, metaargilitas, pizarras, filitas, cuarzitas y calizas	Relieve estructural de materiales Paleozoicos y Triásicos	6
14	17- Calizas y Dolomías	Relieve estructural de materiales Paleozoicos y Triásicos	6

**Tabla 1.** Definición de las clases erosivas en función de la litología y geomorfología y reclasificación en niveles erosivos.

NIVEL EROSIVO	INTENSIDAD	PROCESOS EROSIVOS MÁS DESTACADOS
1	Erosión muy alta	Desarrollo de sistemas de galerías y zonas de badlands. Desarrollo localizado de rilling (cárcavas), piping y mudflows
2	Erosión alta	Desarrollo de galerías, localización de badlands y piping
3	Erosión media-alta	Erosión en lámina con formación de galerías poco desarrolladas
4	Erosión media	Erosión en lámina. Escaso y generalmente superficial acarcavamiento (rilling) y galerías. Localizados deslizamientos a través de derrubios (socavones)
5	Erosión media-baja	Suave erosión en lámina o sedimentación. Localización de suaves canales móviles
6	Erosión baja	Localización de algunos movimientos en masa o suave erosión laminar. Karstificación en algunas áreas
7	Erosión muy baja	Localizados socavones laterales que provocan caídas de rocas

**Tabla 2.** Niveles Erosivos y procesos erosivos más destacados en cada nivel.

materiales paleozoicos y triásicos.

La definición de las áreas de entrenamiento se ha llevado a cabo en función de las clases anteriormente determinadas. Se han seleccionado regiones lo suficientemente homogéneas como para no introducir mezclas de clases, pero a la vez con cierta heterogeneidad para que permitan definir bien cada clase. Por regla general se han tomado 4 polígonos de entrenamiento para cada clase, que suman una media de 200 a 300 píxeles.

En la figura 4 se representan las firmas espectrales de las 14 clases. Se observa que varias clases tienen firmas espectrales equivalentes en gran parte del espectro, pero que difieren en alguna banda espectral. Esto corrobora que el parecido de los materiales de la cuenca sedimentaria es muy elevado, lo cuál dificulta la caracterización de las diferencias de comportamiento frente a los agentes erosivos. Por ello, para la clasificación digital, se ha preferido utilizar la imagen ASTER en lugar de la ETM+, por su mayor información espectral (9 bandas) y, consecuentemente, mayor capacidad de discriminación.

Como se ha indicado antes, la topografía es un factor determinante en la intensidad y frecuencia de los procesos erosivos de tipo hídrico, por lo que es importante introducir esta información en el proceso de clasificación. Para ello, se ha realizado un análisis textural del MDT mediante un filtro de tipo ocurrencia y se ha utilizado la imagen-resultado como información de contexto en la fase de asignación.

Se ha utilizado el método de asignación de máxima verosimilitud o probabilidad, que supone una distribución multinormal de los valores de la imagen. De esta manera, conocidas la media y la desviación típica de cada clase, se puede calcular la probabilidad de pertenencia de un píxel a cada una de las clases (Schowengerdt, 2007; Richards, 2006):

$$p(x/A) = (2\pi)^{-m/2} |V_A|^{-0.5} \exp\left\{-0.5(M_x - M_A)^T V_A^{-1} (M_x - M_A)\right\}$$

donde:

m=n° de bandas

VA=determinante de la matriz de varianza-covarianza para la clase A

Mx= el vector de ND (reflectancia) asociado con el píxel x

Ma=vector de ND (reflectancia) medio de la categoría o clase A

Así, un píxel (x) será asignado a una clase A siempre y cuando su probabilidad de pertenencia a esa clase sea mayor que la de pertenencia a cualquier otra B.

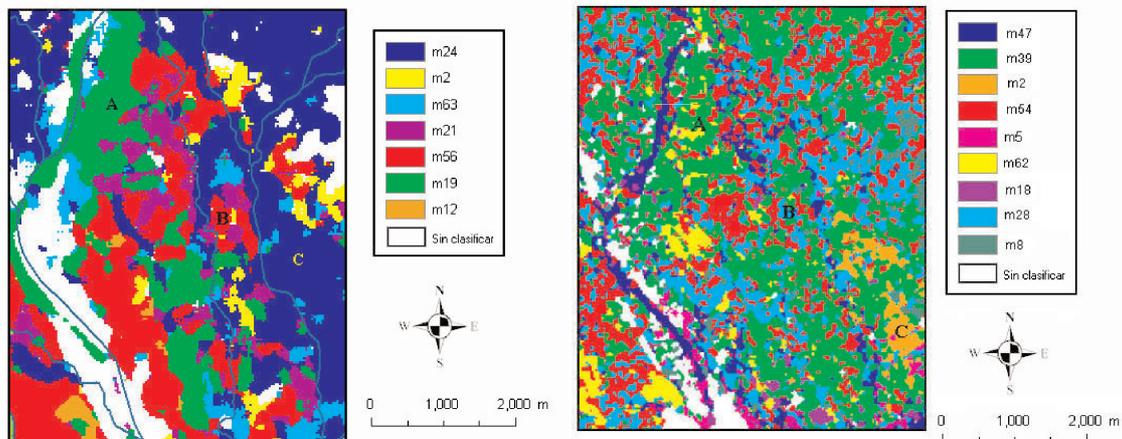
$$p(x/A)p(A) \geq p(x/B)p(B)$$

La imagen clasificada se ha suavizado con un filtro de moda (3x3 píxeles).

Finalmente, se ha procedido a la definición de los niveles de susceptibilidad a la erosión (niveles erosivos) de cada una de las clases erosivas establecidas, en función de la intensidad y frecuencia de los procesos erosivos observados en campo; asimismo de los resultados cartográficos obtenidos en estudios previos (Chica-Olmo, 1992). Así, se han establecido 7 niveles erosivos según se describe en la tabla 2. A grandes rasgos, se puede decir que la clase 1 se desarrolla principalmente sobre materiales del tipo marga y margocaliza; la clase 2 tanto sobre margas y margocalizas como arenas y areniscas; la clase 3 sobre los conglomerados y gravas del Mioceno; la clase 4 sobre los conglomerados y gravas del Cuaternario (glacis); la clase 5 sobre el material coluvial o conglomerados de los depósitos y terrazas fluviales; la clase 6 sobre los relieves estructurales del Paleozoico y el Triás; y la clase 7 sobre el material aluvial y las terrazas fluviales más recientes, que están cultivadas con cítricos en regadío.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La caracterización litológica de la región a partir de la fotointerpretación de la transformación decorrelation stretch de la imagen ETM+, ha proporcionado resultados muy satisfactorios, aportando una información de gran valía para la fotointerpretación y posterior clasificación digital de la imagen, permitiendo discriminar entre zonas que no estaban bien diferenciadas en la cartografía geológica de base. Un ejemplo de lo indicado corresponde al sector oriental de la rambla del Saliente representado en la figura 1, en el que se han discriminado diferentes abanicos aluviales. Así, el abanico señalado como A ha sido interpretado como conglomerados, gravas, arenas y arcillas del Cuaternario. El abanico B, dadas su coloración y textura, se interpreta con una litología similar a la de la zona indicada con D en la figura, como combinación de conglomerados, gravas y arenas del Cuaternario indiferenciado, con margas y margocalizas con intercalaciones de arenas y areniscas. Y el abanico C ha sido interpretado como conglomerados, gravas, arenas y arcillas combinadas con un cuaternario indiferenciado. En resumen, la interpretación de ese sector ha sido considerar una combinación de tres formaciones litológicas diferentes: Cuaternario indiferenciado; conglomerados, gra-



**Figura 5.** Detalle de la clasificación de las imágenes ETM+ (izquierda) y ASTER (derecha) a partir de las muestras de espectrorradiometría de campo (sector de la rambla del Saliente).

vas, arenas y arcillas; y margas y margocalizas con intercalaciones de arenas y areniscas.

La caracterización realizada mediante fotointerpretación de las imágenes realizadas se ha comparado con los resultados de la clasificación de las imágenes con el método SAM, a partir de las muestras de espectrorradiometría de campo (figura 5). Como se observa en ambas clasificaciones, los abanicos aluviales representados con A y C quedan bien diferenciados, apareciendo más difuso el abanico B. Así, el abanico A ha sido clasificado principalmente con las muestras 19 (ETM+) y 39 (ASTER), tomadas sobre conglomerados, gravas y arenas; el abanico B, se ha clasificado con varias muestras de espectrorradiometría procedentes de conglomerados y gravas por una parte, y margas y margocalizas por la otra; y el abanico C se ha clasificado principalmente con muestras tomadas sobre cuaternario indiferenciado y sobre conglomerados, gravas, arenas y arcillas.

Aunque existe una cierta concordancia entre la información extraída de la fotointerpretación y los resultados de la clasificación, es evidente que el uso de medidas de radiometría de campo presenta una serie de limitaciones, como son la disponibilidad de un número pequeño de medidas dada la variabilidad litológica de los materiales y que la clasificación no se realiza con todo el espectro tomado en campo, sino que sólo se seleccionan las medidas coincidentes con las bandas de la imagen, por lo que sólo se utiliza una parte pequeña de la información tomada en campo, lo cuál limita los resultados.

Otros de los trabajos realizados en la fase de caracterización geomorfológica del área de estudio, se ha centrado en la aplicación de un filtro laplaciano a las imágenes de satélite. Los resultados obtenidos han

sido importantes tanto para la localización de los contactos entre los materiales, como para la caracterización de los procesos erosivos activos, con una primera interpretación de la relación existente entre la densidad de la red de drenaje y el material por el que discurre: la densidad de la red es mayor en el material de pié de monte: coluvial y conglomerados, gravas, arenas y arcillas del Cuaternario; y es algo menor en las margas y margocalizas del Mioceno superior. Esto es debido a la diferencia de permeabilidad entre los materiales observados.

En cuanto a la clasificación digital supervisada de la imagen ASTER, el mapa resultante es el de la figura 6. Los resultados obtenidos pueden considerarse satisfactorios, dado que la matriz de confusión (tabla 3) presenta un coeficiente de Kappa de 0.88, y un porcentaje de acierto del 90%. En este punto se debe tener en cuenta que el método desarrollado no es una clasificación de una variable directa, sino de una variable indirecta (clase erosiva) que integra información litológica y geomorfológica, y que en el proceso no sólo se tiene en cuenta la radiometría de las 9 bandas de la imagen ASTER, sino también la información de contexto derivada del MDT.

Como se observa en la tabla 3, la clase que peor clasifica es la 5, compuesta por conglomerados, gravas, arenas y arcillas del Mioceno (conglomerados rojos). Esto puede estar condicionado porque es una clase que abarca una gran superficie y que está recorrida por una gran cantidad de canales fluviales que discurren de forma subparalela en el sentido norte a sur, favoreciendo la aparición de materiales subyacentes debido a la erosión fluvial, así como el depósito de sedimentos procedentes de relieves colindantes (este es el caso más frecuente, dado que

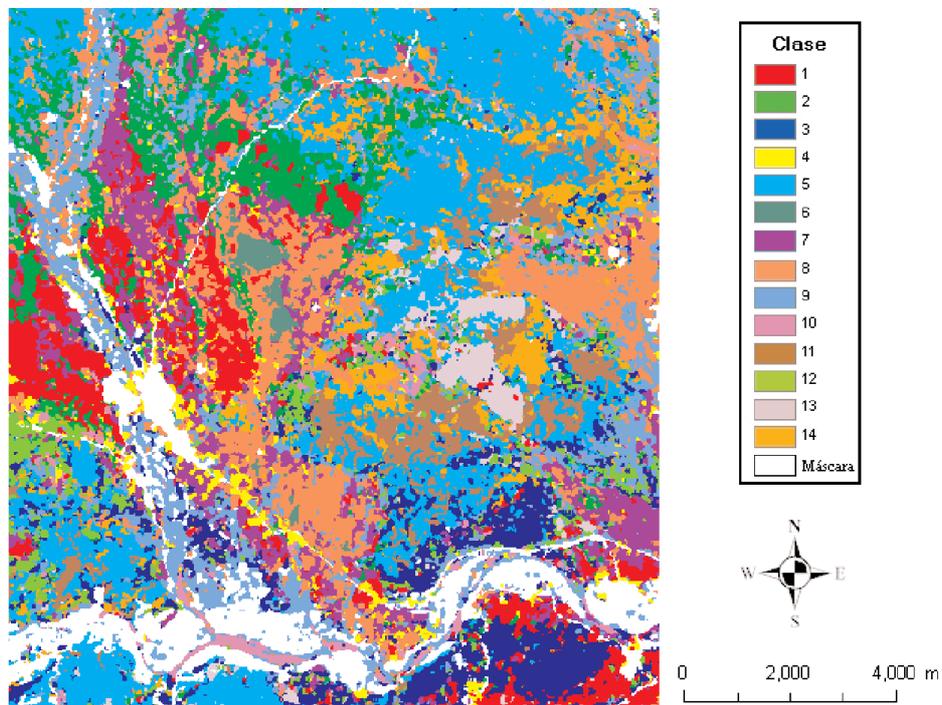


Figura 6. Mapa de clases erosivas obtenido de la clasificación digital de la imagen ASTER.

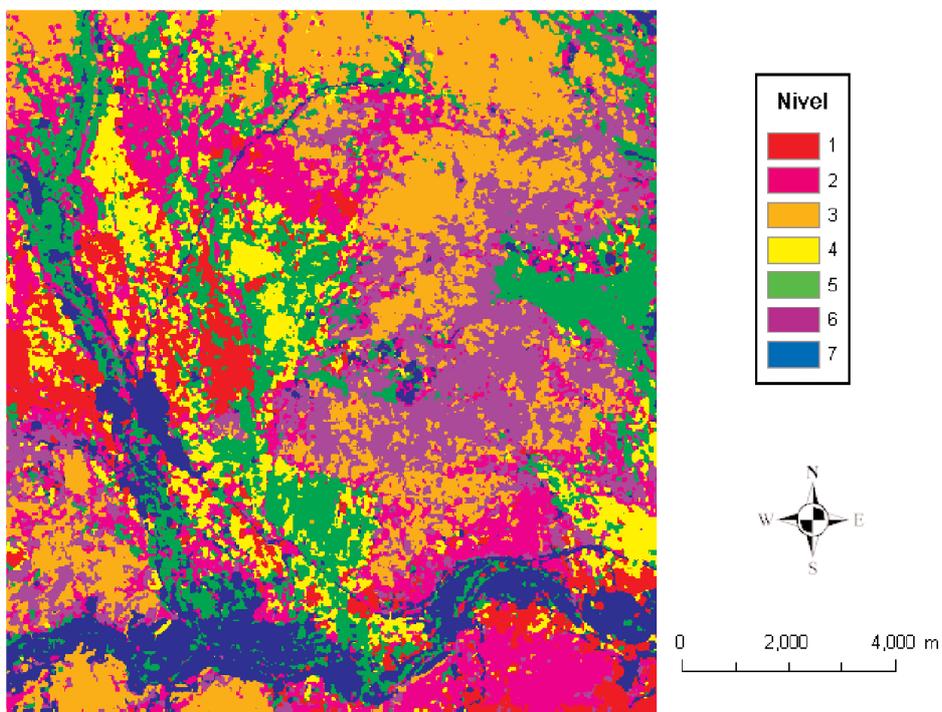


Figura 7. Mapa de susceptibilidad a la erosión (nivel erosivo).

CLASE	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	Total
<b>C1(i)</b>	<b>94.18</b>	1.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47	0.00	0.00	12.19
<b>C2(i)</b>	0.00	<b>86.56</b>	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.62	0.00	0.00	7.76
<b>C3(i)</b>	1.32	0.40	<b>85.33</b>	0.00	2.60	0.00	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	5.15	0.00	0.51	5.07
<b>C4(i)</b>	0.26	6.32	0.00	<b>86.62</b>	0.00	0.00	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.77
<b>C5(i)</b>	0.00	0.00	0.67	0.00	<b>76.30</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.17	2.21	0.71	5.08	9.00
<b>C6(i)</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>100</b>	0.00	2.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.47
<b>C7(i)</b>	3.17	0.00	0.67	7.04	0.00	0.00	<b>86.79</b>	0.00	4.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.29
<b>C8(i)</b>	0.00	3.95	0.00	4.23	0.00	0.00	10.38	<b>97.33</b>	4.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.45
<b>C9(i)</b>	0.00	1.58	12.67	2.11	0.65	0.00	0.94	0.00	<b>90.04</b>	0.00	0.00	2.21	0.00	0.00	8.09
<b>C10(i)</b>	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>100</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	4.33
<b>C11(i)</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	12.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>87.25</b>	0.00	0.00	6.60	9.10
<b>C12(i)</b>	0.00	0.00	0.67	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	<b>80.15</b>	0.00	0.00	3.83
<b>C13(i)</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.21	<b>99.29</b>	0.00	4.77
<b>C14(i)</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	5.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.58	0.00	0.00	<b>87.82</b>	6.88
<b>Total</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	<b>100</b>

Tabla 3. Matriz de confusión entre áreas de entrenamiento e imagen clasificada (i).

las clases con las que más se confunde son las 11 y 14).

Finalmente, para la integración de estos resultados con otros datos experimentales, climatológicos, mapas temáticos, datos socioeconómicos, etc. en un SIG, se procedió a la reclasificación del mapa de clases erosivas en un mapa de niveles erosivos (figura 7), mediante agregación de clases y de acuerdo a los criterios indicados en la tabla 2. El mapa resultante supone la creación de una herramienta de gran utilidad para la ordenación del territorio, dado que se establecen diferentes niveles de erosión, de magnitud decreciente, que aportan una síntesis de los factores que son determinantes en el desarrollo de los procesos erosivos producidos esencialmente por la acción de las aguas de escorrentía. El análisis del mapa permite advertir que la superficie con susceptibilidad a la erosión de tipo muy alta, alta, o media-alta (niveles 1, 2 y 3) es muy extensa, lo cual muestra de forma cuantitativa aquello que es patente en las observaciones de campo, que se trata de una región con serios problemas de erosión hídrica, en la que los factores antrópicos de abandono de campos de cultivo, cambio en el uso del suelo, etc., aconsejan que se tomen medidas, por parte las administraciones públicas competentes, de planificación territorial, para la lucha contra la erosión del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo se ha desarrollado con la financiación del Proyecto EIGEO CGL2006-06845/CLI del Ministerio de Educación y Ciencia y del grupo de investigación RNM122 de la Junta de Andalucía.

Igualmente estamos agradecidos al Dr. Cecilio Oyonarte Gutiérrez, de la Universidad de Almería, por su colaboración en la toma de muestras de espectrorradiometría de campo, y al Dr. Eduardo García Meléndez, de la Universidad de León, por su ayuda y documentación prestadas para el reconocimiento geológico del área de estudio.

## REFERENCIAS

- CHAVEZ, P., 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 1998, Vol. 24, N°3, pp 459-479.
- CHICA-OLMO, M., VIVES, E., MARTÍN, A. y GUERRA., 1992. *Study on mapping of soil erosion by remote sensing and GIS. An application study in Southeast Spain. Interim report.* Institute of Remote Sensing Applications, JRC, Inspra.
- CHUVIECO, E., 2000: *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*, Barcelona, Ariel Ciencia.
- GARCÍA MELENDEZ, E., 2000: *Geomorfología y geotectónica del Cuaternario de la Cuenca de Huércal-Overa y Corredor del Almanzora (Cordilleras Béticas). Análisis y cartografía mediante teledetección y SIG.* Tesis doctoral, Universidad de Salamanca.
- GUERRA-MERCHÁN, A., 1992: *Origen y Relleno Sedimentario de la Cuenca Neógena del Corredor del Almanzora y Áreas Limitrofes (Cordillera Bética).* Tesis doctoral, Universi-

dad de Granada.

- KRUSE, F. A., LEFKOFF, A. B., BOARDMAN, J. W., HEIDEBRECHT, K. B., SHAPIRO, A. T., BARLOO, P. J., y GOETZ, A. F. H., 1993: The Spectral Image Processing System (SIPS)- Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44, 145-163.
- MARKHAM, B. L., BARKER, J. L., 1986: *Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectances and At-Satellite Temperatures*. EOSAT Landsat Technical Notes, 1986, No. 1.
- RICHARDS, J. A. y XIUPING JIA, 2006: *Remote Sensing Digital Image Analysis: an Introduction*. Berlin, Springer-Verlag.
- SCHOWENGERDT, R. A., 2007: *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Amsterdam, Elsevier.
- VAN DER MEER, F. Y DE JONG, S.M., 2003: *Imaging Spectrometry. Basic Principles and Prospective Applications*. Dordrecht, The Netherland. Kluwer Academic Publishers.
- VIVES RUIZ DE LÓPEZ, E., 1995: *Realce de imágenes digitales en teledetección. Aplicación a la fotointerpretación de rasgos geológicos y geomorfológicos en zonas áridas*. Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- VIVES RUIZ DE LÓPEZ, E. Y CHICA-OLMO, M., 1994: Realce del color y fusión de información para la valoración cualitativa de factores de desertización en una región semi-árida del sureste de España. *Revista de Teledetección*, Nº 3, Noviembre.