

## Detección por el satélite LANDSAT-4 de los efectos de la riada del 8-XI-82 en el río Segre

por Roman ARBIOL BERTRAN \*, Jaume CALVET PORTA \*\*, Oriol VIÑAS I FOLCH \*

\* Institut Cartogràfic de Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Generalitat de Catalunya. Balmes, 209. 08006 - Barcelona.

\*\* Departament de Geomorfologia i Tectònica, Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. Gran Via, n.º 585. 08007 - Barcelona.

### RESUMEN

Por medio de técnicas de tratamiento de imágenes digitales se realiza un estudio de los efectos producidos por una inundación ocurrida a finales del año 1982 en el valle del río Segre, en Catalunya, a partir de la información multispectral captada por el sensor TM del satélite LANDSAT-4.

Utilizando un programa de clasificación no supervisada basado en la distancia euclídea, se diferencian cuatro tipos de suelo o de cubiertas en el área de estudio ( $3.8 \times 2.3$  km). Se efectúa un análisis cuantitativo de la calidad de los resultados, usando como referencia la información obtenida en un estudio de campo. Este análisis muestra un alto grado de correspondencia entre el mapa de campo (verdad terreno) y la cartografía realizada a partir de los datos multispectrales.

### SUMMARY

By means of processing digital pictures, a study was made of the effects of a flood which occurred towards the end of 1982 in the Segre Valley, Catalonia, Spain, by using multi-spectral data picked up by the TM sensor of the LANDSAT-4 satellite.

Using a non-supervised classification program based on the euclidean distance, four types of soil were differentiated in the area studied ( $3.8 \times 2.3$  km). A quantitative analysis was made on the quality of the results by using information obtained in a field study as reference. This analysis showed a high degree of agreement between the map drawn in the field (soil truth) and mapping using multi-spectral data.

*Palabras clave:* Teledetección, LANDSAT-4, Thematic Mapper, Geomorfología fluvial, Riadas.

### INTRODUCCION

Las imágenes captadas por los satélites de observación de la Tierra son una de las fuentes de información de que se dispone para realizar estudios relacionados con las ciencias de la Tierra.

Del tipo de órbita que recorren algunos de estos satélites se deduce la posibilidad de obtener varias imágenes de una misma área captadas a la misma hora solar y espaciadas en el tiempo, imágenes que a su vez corresponden a visiones sinópticas de grandes extensiones de terreno. Estas dos características, unidas al hecho de que la información contenida está numerizada y puede ser tratada con métodos informáticos, han determinado que sean usadas en muchos países como métodos rutinarios de seguimiento de procesos dinámicos, así como del conocimiento del estado del territorio.

En este estudio se trata de evaluar la capacidad del sensor TM del satélite LANDSAT-4 para detectar los efectos ocasionados por una importante riada ocurrida en la cuenca del río Segre de Catalunya a finales del año 1982.

### LA RIADA Y SUS EFECTOS GEOMORFOLOGICOS

Los días 6 y 7 de noviembre de 1982 se produjeron lluvias de gran intensidad en el Pirineo aragonés y catalán. Los totales máximos de estos dos días fueron superiores a 100 mm, lle-

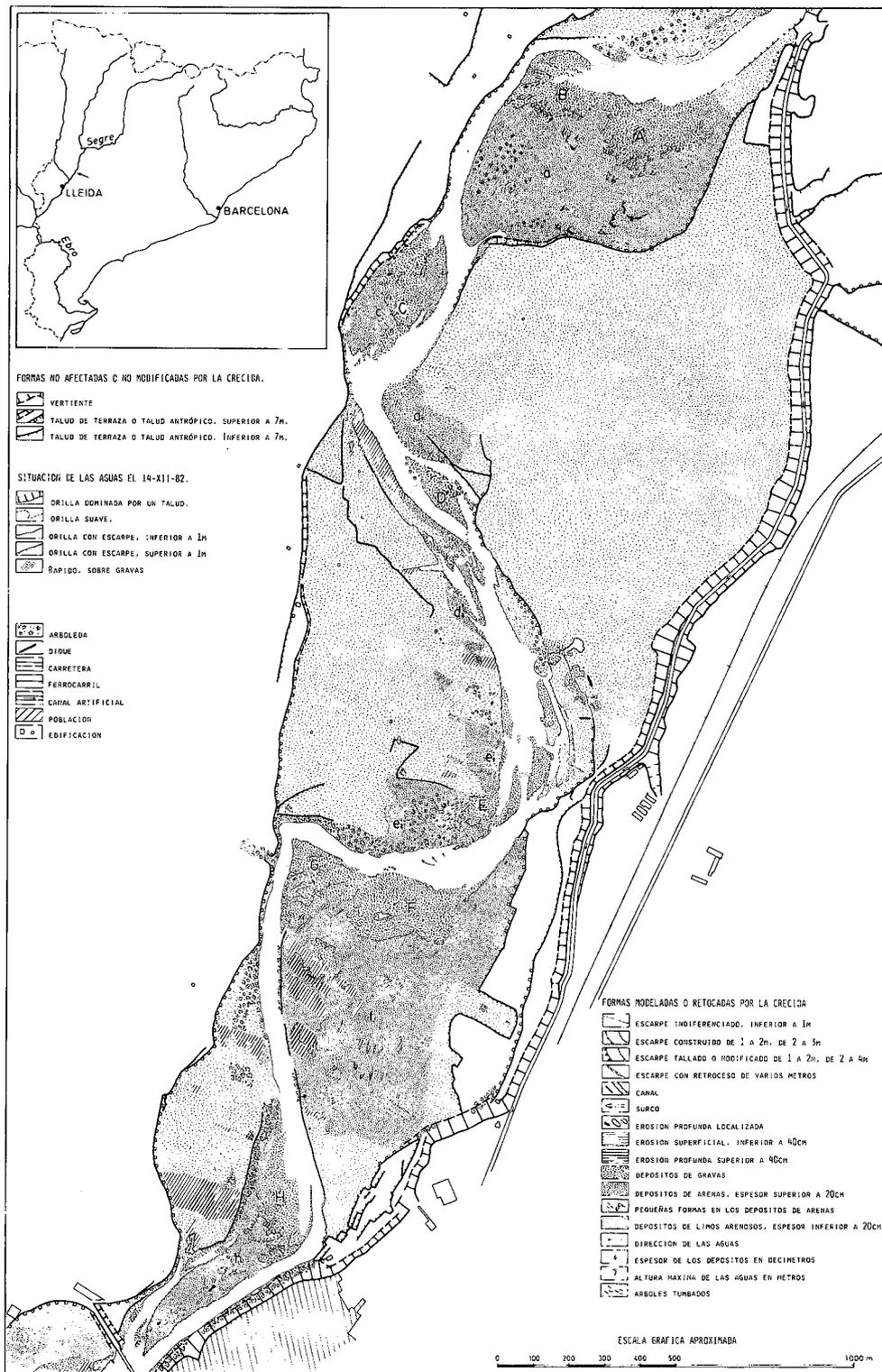


Figura 1.— Cartografía geomorfológica de los efectos de la riada del 8-11-82 en un sector del valle del río Segre, y esquema de su localización.

Figure 1.— Geomorphological mapping of the effects of flooding in 8-11-82 in a sector of the Segre Valley and location.

gando localmente a 555 mm. Estas lluvias provocaron crecidas muy importantes en los ríos Cinca, Segre, Llobregat y Ter.

El tramo del Segre estudiado, situado 15 km aguas arriba de Lleida, corresponde a un sector donde las precipitaciones fueron relativamente bajas, inferiores a 50 mm, por lo que la riada era ya totalmente alóctona. El embalse de Oliana, situado aguas arriba, retrasó ligeramente la riada pero no tuvo un papel laminador importante.

En el tramo estudiado la riada se dió hacia las 12 h del día 8, con caudales máximos de unos 3.200 m<sup>3</sup>/s, y la altura de las aguas alcanzó unos 2 m sobre el área de inundación y unos 6 o 7 m sobre el cauce del río.

La cartografía que presentamos (fig. 1) corresponde a un sector del estudio que uno de los autores realizó por encargo del «Servei Geològic de la Generalitat de Catalunya». El método de trabajo consistió en una fotointerpretación de pares estereoscópicos a escala 1:5.000 y en un reconocimiento de campo en el que se delimitó la extensión, espesor y granulometría de las acumulaciones, y también la altura alcanzada por las aguas.

A continuación damos una breve síntesis descriptiva e interpretativa de los efectos de la

riada en el tramo que estudiamos en este trabajo.

Durante la avenida, gracias a la elevada velocidad de las aguas, se movilizaron las gravas del cauce y las que la socavación arrancó a las orillas. Las gravas con tamaño de hasta 30 cm de diámetro y en algunos casos de hasta 70 cm (bloques) discurrieron por el fondo del lecho del río, acumulándose allí donde las aguas perdían velocidad, debido en general a las sinuosidades del trazado del lecho. Así se formaron toda una serie de lóbulos, algunos de ellos en el mismo lecho del río (D) o a caballo entre el lecho y la zona de inundación (E, H). Otros, en las sinuosidades más marcadas, se edificaron totalmente sobre el área de inundación (A, B, C, F, G).

Los lóbulos A-B y F-G, situados en sinuosidades muy marcadas, corresponden a variaciones de situación de la corriente de agua de máxima velocidad. Durante el máximo de la crecida se edificaron los lóbulos A y F, y al bajar las aguas la corriente se adaptó al cauce y se construyeron B y G. La acumulación de estas importantes masas de gravas fue concomitante con una importante erosión y destrucción de la vegetación que puede ser generalizada y/o concentrada formando profundos surcos.

#### CONVENTIONAL SYMBOLS

##### LANDFORMS NOT AFFECTED BY FLOOD

	HILL SLOPE
	TERRACE SCARP, >7 M HIGH
	TERRACE SCARP, <7 M HIGH

##### WATER EDGES ON 14-12-82

	BANK AGAINST HILL SLOPE
	GENTLE BANK
	BANK SCARP, <1 M HIGH
	BANK SCARP, >1 M HIGH
	RAPID ON GRAVELS

	TREE PLANTATION
	DIKE
	ROAD
	RAILWAY
	ARTIFICIAL CANAL
	VILLAGE
	BUILDINGS

##### LANDFORMS MODELLED OR REWORKED BY FLOOD

	UNDIFFERENTIATED SCARP, <1 M HIGH
	ACCRETION SCARP, FROM 1 TO 3 M
	EROSIONAL SCARP, FROM 1 TO 4 M
	RETREAT OF BANK
	CHUTE
	ELONGATED SCOUR
	SCOUR HOLE
	EROSION, <40 CM DEEP
	EROSION, >40 CM DEEP
	GRAVEL DEPOSITS
	SAND DEPOSITS, >20 CM THICK
	SMALL LANDFORMS ON SAND ACCUMULATIONS
	SAND AND SILT ACCUMULATIONS, <20 CM THICK
	FLOW DIRECTIONS
	THICKNESS OF DEPOSITS IN DECIMETRES
	MAXIMUM FLOOD WATER HEIGHT IN METRES
	FLOW-FLATTEN TREES

Al bajar el nivel de las aguas de la riada el flujo se constriñó progresivamente en el cauce y formó incisiones en los lóbulos de gravas acumuladas en el lecho, confiriéndoles la fisonomía que aparece en el mapa.

Formando una especie de aureola a los lóbulos de grava se depositó un manto de arenas (a, c, e<sub>2</sub>, f, h) debido igualmente a la pérdida de velocidad de las aguas al invadir el lecho de inundación. La acumulación de arenas fue sobre todo importante junto a los lóbulos de gravas y en áreas con vegetación que sin haber sido totalmente destruida frenó las aguas y favoreció su depósito.

En algunos puntos las arenas se depositaron donde una parte del flujo de las aguas salía oblicuamente del lecho y pasaba al área de inundación (d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, e<sub>1</sub>) (diques naturales). Estas arenas, en general, son de tamaño inferior a 0.5 mm de diámetro y se acompañan de un 10 a un 30 % de limos.

En el resto del área inundada, donde las aguas alcanzaron poca altura y las velocidades fueron menores, se decantaron limos, en realidad limos arenosos, con espesores del orden de pocos centímetros. Estas acumulaciones se vieron favorecidas por las irregularidades del terreno (disposición de los campos, márgenes, etc.) y por la presencia de vegetación.

Aparte de la fuerte erosión ligada a la acumulación de las gravas se dieron otras erosiones localizadas, condicionadas por la microtopografía como, por ejemplo, los márgenes en los que al caer las aguas se aceleran, o condicionadas por el estado del suelo, de forma que los campos que habían sido arados poco antes de la riada sufrieron una fuerte erosión. Cabe, por fin, reseñar importantes retrocesos por socavación de las orillas.

La acción de la riada sobre la vegetación fue sumamente importante en los frutales próximos al río; las aguas arrancaron los árboles y llevaron sus restos flotando que, en parte, se acumularon en otros frutales formando densas masas de detritus vegetales. En muchos frutales los árboles fueron fuertemente basculados.

#### DATOS DIGITALES DE BASE

El estudio se ha basado en los datos captados por el sensor TM del satélite LANDSAT-4 el día 23 de enero de 1983 sobre el territorio de Catalunya, dos meses y medio después de



Imagen 1.— Imagen correspondiente al área estudiada, obtenida con el canal 5 del sensor TM.

Image 1.— Landsat 4 thematic mapper (TM), band 4, of the study area.

las graves inundaciones ocurridas. Esta información, correspondiente a la cinta o imagen 198/31 de la fecha indicada (1), fue obtenida a unos 705 km de altura y constituye una de las escasas imágenes desprovistas de nubes que el sensor TM del satélite indicado captó sobre Catalunya antes de dejar de funcionar. En la actualidad ya es operativo un nuevo satélite con las mismas características que el citado.

La captación de la información se realiza de una manera secuencial mediante un dispositivo que contiene un espejo giratorio que refleja la radiación proveniente del terreno hacia los sensores. En cada posición del espejo, la radiación reflejada corresponde a la que proviene de la unidad de superficie detectable, extensión que

(1) La cinta magnética usada es propiedad del «Departament de Política Territorial i Obres Públiques» de la «Generalitat de Catalunya».

está determinada por las características del mismo sensor y por la altura del satélite y que se denomina *pixel* (picture element); para el caso del sensor TM el *pixel* posee unas dimensiones de 30 × 30 m. Por cada ciclo del movimiento del espejo se registra una banda del terreno de 1 *pixel* de anchura por 185 km de longitud, y por estar sincronizados el avance del satélite con la velocidad de giro del espejo, su misma translación determina el registro de bandas paralelas y contiguas.

El satélite LANDSAT-4 posee dos dispositivos de registro: el MSS (Multispectral scanner) y el TM (Thematic mapper). Estos instrumentos consisten en series de sensores sensibles a determinadas zonas del espectro electromagnético (canales espectrales) en las que se mide la intensidad de la radiación reflejada o emitida por el terreno. Esta información es numerizada con una escala de valores comprendidos entre el 0 y el 255 de acuerdo con la intensidad, retransmitida a tierra y almacenada en cintas magnéticas (CCT) que pueden ser leídas por los ordenadores.

Cada CCT correspondiente a una imagen captada por los sensores MSS o TM se refiere a una extensión del terreno de 185 × 185 km y para cada *pixel* contiene, respectivamente, 4 o 7 valores numéricos que son proporcionales a la intensidad de la radiación reflejada en cada uno de los distintos canales espectrales del dispositivo.

Las características espectrales y espaciales de los sensores del satélite LANDSAT-4 son las siguientes:

	MSS	
	Longitud de onda	Resolución
Canal 1	0.5 - 0.6 $\mu\text{m}$	80 m
Canal 2	0.6 - 0.7 $\mu\text{m}$	»
Canal 3	0.7 - 0.8 $\mu\text{m}$	»
Canal 4	0.8 - 1.1 $\mu\text{m}$	»
	TM	
	Longitud de onda	Resolución
Canal 1	0.45 - 0.52 $\mu\text{m}$	30 m
Canal 2	0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$	»
Canal 3	0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$	»
Canal 4	0.76 - 0.90 $\mu\text{m}$	»
Canal 5	1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$	»
Canal 6	10.40 - 12.50 $\mu\text{m}$	120 m
Canal 7	2.08 - 2.35 $\mu\text{m}$	30 m

## EQUIPO INFORMÁTICO UTILIZADO

El soporte físico disponible en estos momentos en el «Institut Cartogràfic de Catalunya» para realizar el presente estudio se compone de una unidad central de proceso VAX 11-780 con 4 MB de memoria central, un sistema operativo VMS, dos unidades de cinta magnética de 800/1600 bps y dos unidades de disco de 300 MB cada una. El sistema de representación y tratamiento es un COMTAL VISION ONE/20 con 512 × 512 × 28 bits de memoria para almacenar gráficos e imágenes. Se dispone también de un plotter plano con cabezal óptico para la adecuada impresión de los gráficos de salida.

El «software» de tratamiento se compone de unos 50 programas y 25.000 líneas de código FORTRAN desarrollado en el «Centre de Calcul de la Universitat Politècnica de Catalunya» (Arbiol et al., 1983), modificado y ampliado en el ICC. Este «software» se denomina sistema o aplicación RS.

## EJECUCION DEL ESTUDIO

### *Pretratamiento de los datos*

La primera etapa ha consistido en la localización del área de estudio en la cinta magnética y en la creación de un archivo en el disco del ordenador con la información multiespectral correspondiente, para posibilitar su tratamiento posterior con el sistema RS. Este proceso requiere el uso de unos programas básicos que permite la visualización de la información en forma de imágenes en blanco y negro, y el cálculo de las coordenadas de cualquiera de los *pixels* de la imagen representada por la pantalla gráfica. Una vez reconocida el área de interés y extraídas sus coordenadas se construyó el archivo correspondiente con la información contenida en los siete canales espectrales.

Inicialmente se construyó el archivo denominado SEGREN.LOA de 512 × 512 *pixels* (15.360 × 15.360 m). Este archivo fue usado como archivo base y se le aplicaron diversos programas de mejora de contrastes que permitieron concretar el área de estudio en una parte del mismo. El método de realce de contrastes que se utilizó fue la generación de representaciones en falso color. Este método consiste en obtener imágenes coloreadas por superposición de tres

representaciones correspondientes a tres canales espectrales, expresadas cada una en uno de los colores básicos siguientes: azul, verde y rojo. De esta forma, en la imagen en falso color que resulta, cada *pixel* adopta un color que es resultado de la intensidad de radiación reflejada en los tres canales elegidos, así como del color que se asigna a cada canal.

La observación de estas imágenes permitió establecer con mucha claridad la extensión real del área de inundación por el notable contraste con que aparecía en relación al área no afectada, y se decidió construir una máscara con los límites de la inundación con el fin de conservar únicamente los *pixels* correspondientes a áreas afectadas y desestimar los situados fuera de la misma. Este proceso consistió en digitalizar sobre la pantalla del sistema de representación la línea fronteriza, usando un programa que cambia a cero los valores espectrales de los *pixels* que quedan fuera del área digitalizada, conservando, sin embargo, los de los contenidos en ella. Finalmente se decidió concentrar el estudio en un área reducida de aproximadamente  $3.8 \times 2.3$  km y se creó el archivo denominado SSEGREN.LOA que fue, en definitiva, el área estudiada.

#### Tratamiento de los datos

La idea básica del tratamiento consiste en identificar los diversos tipos de suelo o de cubiertas del terreno a partir de la información multiespectral captada por el satélite. Esta identificación es posible, teóricamente, porque la intensidad de la radiación reflejada o emitida por el terreno y registrada por los diversos canales espectrales del sensor (respuesta espectral) es distinta según el tipo de suelo o de cubierta presente, esto es, las respuestas espectrales de dos superficies semejantes son más parecidas que las originadas por dos superficies distintas.

Así pues, es preciso efectuar una comparación entre las respuestas espectrales de los *pixels* para poderlos agrupar por su semejanza y llegar a establecer una correspondencia entre cada grupo y un tipo de suelo o de cubierta. Este análisis requiere un tratamiento informático, debido al enorme volumen de datos que supone (una imagen de  $500 \times 500$  *pixels* registrada por el TM contiene  $250.000 \times 7$  números), y una aproximación matemática que defina la semejanza entre las respuestas.

El proceso del tratamiento de los datos conduce a una segmentación de la imagen en un conjunto de clases espectrales. Cada clase espectral está constituida por un conjunto de *pixels* que presentan una respuesta espectral similar, caracterizada por su centro o promedio de las respuestas espectrales de todos los *pixels* que contiene y por las desviaciones tipo que suponen. En principio las diversas clases espectrales se corresponden con los diversos tipos de suelo o cubierta que hay en la zona registrada.

Una vez hecha la clasificación de la imagen se realiza el proceso de identificación de las clases con el tipo de suelo o de cubierta que le corresponde. En esta fase se requiere un cierto conocimiento del terreno que permita establecer la correspondencia, información que puede obtenerse de estudios previos de la zona, o por medio de estudios de campo localizados en pequeñas áreas representativas de la diversidad existente en la zona estudiada.

En este estudio se han encontrado las clases espectrales por medio de un programa que se basa en la mínima distancia euclídea. El programa calcula la distancia euclídea de la respuesta espectral de cada *pixel* a los centros de las clases espectrales existentes, asigna este *pixel* a la clase de cuyo centro diste menos y recalcula el centro de esta clase teniendo en cuenta el nuevo *pixel*. Sin embargo, si esta distancia es mayor que un parámetro establecido por el usuario, el *pixel* pasa a constituir el centro de una nueva clase. En este proceso, al analizar el primer *pixel* y puesto que todavía no se ha generado ninguna clase, la respuesta espectral de este *pixel* pasa a constituir el centro de una clase.

Cuanto mayor es el parámetro establecido por el usuario, menor es el número de clases. Para escoger el parámetro adecuado se procede, en general, a una serie de ensayos.

La distancia euclídea se calcula con la fórmula:

$$NCU = \sum_{i=1}^n (c_i - p_i)^2 \quad \text{donde: } NCU = \text{n.º de canales utilizados.}$$

$i$  = canal espectral

$c_i$  = centro de una clase para el canal  $i$

$p_i$  = respuesta espectral de un *pixel* en el canal  $i$

Tras analizar cada asignación el programa recalcula de nuevo el centro de la clase como promedio de las respuestas espectrales de todos los *pixels* que contiene.

Esta es una forma denominada «no supervisada» de encontrar las clases espectrales, esto es, una forma que es completamente automática y que no requiere ningún conocimiento previo del área de estudio. La aplicación de este programa en el archivo SSEGREN.LOA dio como resultado un conjunto de 23 clases espectrales.

Seguidamente se procedió al análisis de su representatividad, basado en sus características espectrales y en su distribución espacial, visualizándose una a una las distintas clases espectrales por la pantalla del sistema de representación, con la idea de eliminar aquellas clases con pocos *pixels* o las que los presentaban de forma dispersa sin llegar a formar áreas de concentración. Como consecuencia de este análisis se eliminaron cuatro de las clases originales y se decidió, además, proceder a dividir una de ellas en otras dos por tener desviaciones tipo demasiadas elevadas y por corresponder a unidades diversas de terreno. Esta división se realizó por sustitución del centro antiguo por otros dos derivados de él por adi-

ción y sustracción de la desviación tipo. Los 20 centros espectrales definitivos se indican en la tabla I. La clase 1 corresponde a los *pixels* situados fuera del área de inundación, cuyos valores de reflectancia han sido cambiados por cero en la fase de pretratamiento.

#### Formación de grupos

Una vez obtenidas las 20 clases espectrales se procedió a agruparlas por sus semejanzas. Por una parte, el establecimiento de los grupos se basó en su semejanza temática. Para ello se realizó, primeramente, una comparación grosera entre la distribución espacial de cada clase, visualizadas en la pantalla del sistema de representación, y los datos de campo, expresados sobre mapas. A continuación se efectuaron superposiciones entre estos mapas y representaciones de las clases espectrales obtenidas sobre papel por medio de una impresora, superposiciones que permitieron identificar el tipo de suelo correspondiente a cada *pixel*. De esta forma se llegó a establecer la correspondencia temática de cada clase y se las pudo asignar a un grupo.

Paralelamente se realizó una representación

Tabla I.— Características espectrales de las 20 clases encontradas de forma automática.  
Table I.— Spectral features of the 20 classes automatically found.

Clase Class	Número de Number of pixels	Reflectancia en los canales Reflectance in channels							Desviación tipo para los canales Standard deviation for channels						
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	5302	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	401	54.3	21.7	22.7	36.3	39.2	80.8	17.8	1.5	0.8	1.3	3.0	2.7	1.7	1.9
3	741	57.0	23.4	26.2	29.6	38.5	80.0	21.5	1.8	1.1	1.2	2.4	2.5	1.8	1.9
4	991	55.1	21.8	23.6	26.7	31.1	78.6	16.5	1.6	0.8	1.4	1.8	1.8	1.5	1.5
5	196	53.6	20.3	19.3	15.1	12.4	80.2	6.5	1.7	0.8	1.1	2.0	2.3	1.6	1.5
6	443	54.3	21.2	21.9	24.3	25.2	78.3	12.9	1.5	0.8	1.3	2.8	2.2	1.6	1.2
7	406	58.9	25.2	28.6	31.2	43.7	80.4	25.8	2.0	1.3	1.6	2.4	2.4	2.0	1.9
8	73	53.8	21.8	21.4	44.5	32.6	78.1	13.6	1.8	0.7	0.8	4.3	2.4	1.4	1.6
9	166	59.5	24.2	26.3	26.9	26.9	78.8	14.6	2.3	1.5	1.7	2.3	3.0	2.0	2.0
10	153	66.4	28.4	32.8	31.7	39.5	79.1	23.1	2.9	1.6	1.8	1.3	2.7	2.0	2.3
11	90	69.7	31.0	36.0	33.7	46.0	77.9	27.7	3.7	2.1	1.8	1.1	2.1	1.9	1.8
12	33	72.6	32.8	38.4	36.2	51.5	77.7	32.0	2.1	1.3	1.5	1.4	3.1	2.7	3.3
13	140	55.1	21.0	21.1	20.7	17.5	78.9	9.1	1.9	1.0	1.3	3.1	3.0	1.8	1.9
14	79	63.3	28.0	32.8	32.9	50.9	80.9	32.2	2.7	1.4	2.1	1.8	3.2	1.9	3.0
15	442	55.0	22.3	24.5	27.8	35.1	79.1	19.0	1.6	0.9	1.3	1.9	1.3	1.7	1.5
16	467	53.7	21.2	21.7	32.5	31.6	78.3	14.5	1.4	0.8	0.9	2.4	2.3	1.2	1.7
17	43	60.6	24.4	25.9	24.3	19.0	79.9	10.8	2.5	1.4	1.7	2.6	2.5	1.5	1.8
18	103	62.8	26.0	29.3	29.7	34.9	78.3	19.5	2.8	1.1	1.6	1.6	2.4	1.9	1.8
19	23	54.7	20.9	20.6	17.8	26.0	79.0	13.9	1.4	0.9	1.1	1.3	2.1	1.3	1.5
20	28	56.1	22.0	22.4	20.8	29.2	79.9	15.9	1.9	0.9	1.3	1.7	2.2	1.6	1.7

gráfica de las firmas espectrales de las clases (fig. 2) y se estableció a partir de las similitudes entre ellas otra agrupación, de forma que las clases con valores de reflectancia parecidos en los diversos canales espectrales se consideraban como pertenecientes a un mismo grupo.

En ambos casos las agrupaciones realizadas resultaron muy similares con tan solo algunas diferencias para las clases 9, 17, 19 y 20. Los grupos establecidos a partir de la semejanza espectral fueron, de partida, los cinco siguientes:

- Grupo A: clases 12, 11, 10, 18
- Grupo B: » 14, 7, 3, 15, 4
- Grupo C: » 8, 2, 16, 6
- Grupo D: » 5, 13
- Grupo E: » 9, 17, 20, 19

A continuación se incorpora una ligera exposición de las características espectrales de los grupos obtenidos, así como una referencia temática deducida de la comparación entre su

distribución espacial y los mapas de campo y fotografías disponibles:

*Grupo A.* Formado por clases con una firma espectral sensiblemente similar que varían sólo en la intensidad absoluta de reflectancia registrada por canal espectral, pero con valores relativos semejantes entre canales que conduce a que se mantenga el paralelismo entre las firmas.

Este grupo corresponde a áreas con acumulaciones importantes de gravas o de arenas, con o sin restos de árboles destruidos por la nada; a depósitos importantes de arenas en áreas arboladas donde la vegetación ha frenado el agua y favorecido, por lo tanto, la acumulación, y donde una notable cantidad de árboles no han sido destruidos; áreas de la zona de inundación donde las aguas han barrido los árboles.

En resumen, el grupo A identifica acumulaciones importantes de materiales, mayoritariamente de gravas, pero también de arenas, formando depósitos de hasta 1 m de espesor, y áreas donde ha tenido lugar una fuerte ero-

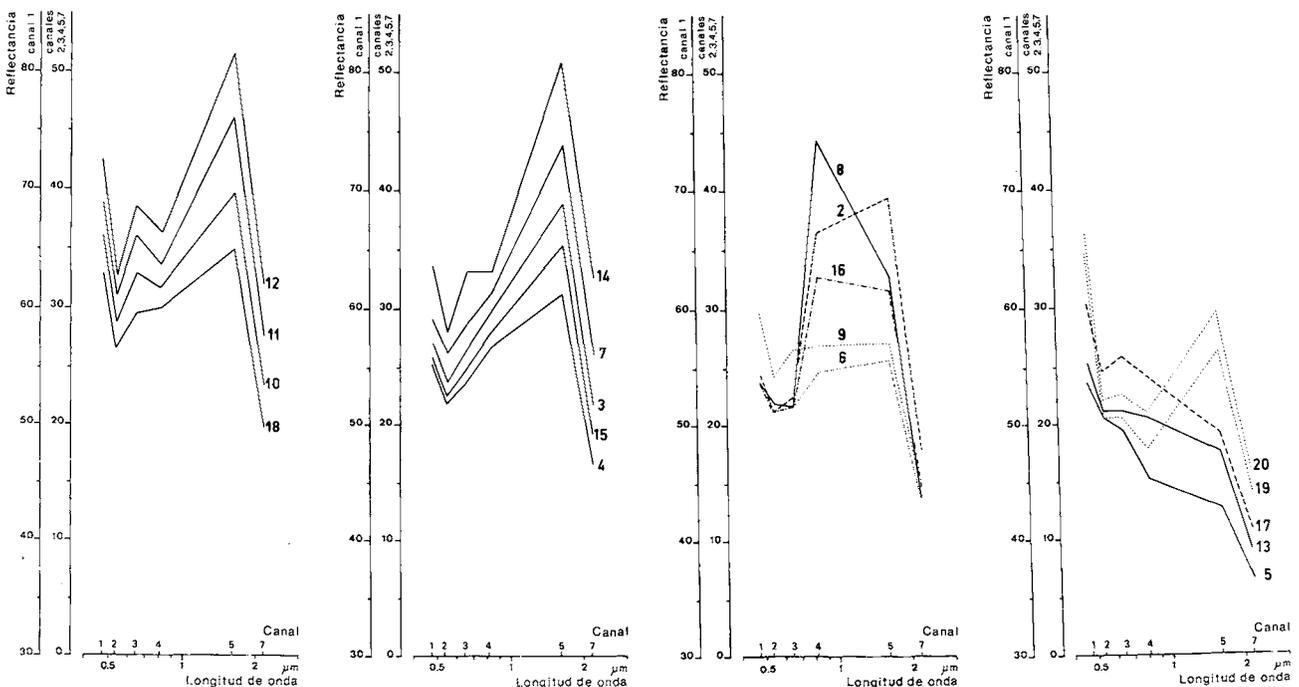


Figura 2.— Firmas espectrales de las 20 clases encontradas automáticamente. La respuesta en el canal 6 ha sido omitida por ser muy parecida en todas las clases.

Figure 2.— Spectral signatures of 20 classes which were found automatically. Response in channel 6 has been omitted because of great similarity in all classes.

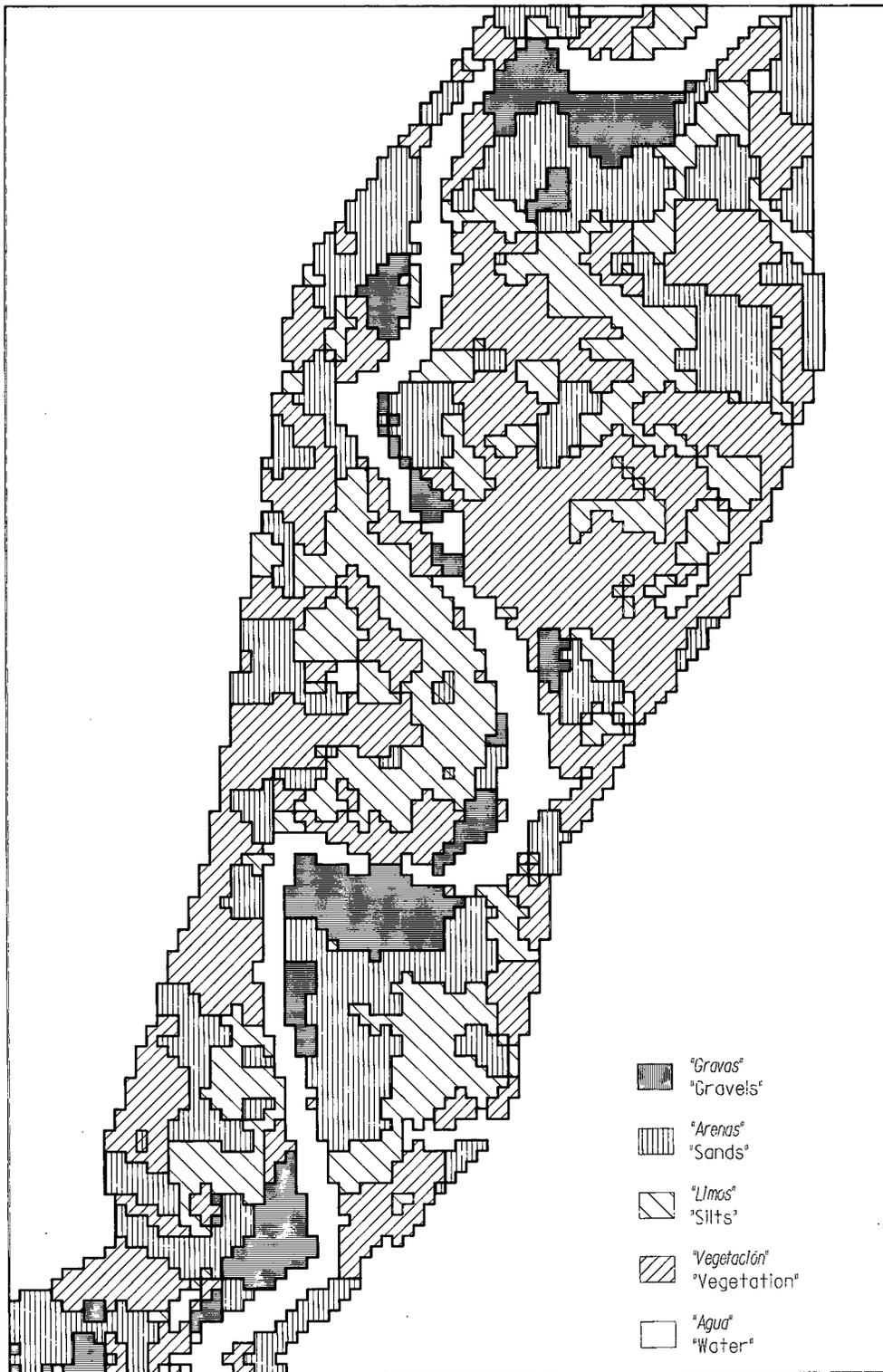


Figura 3a.— Cartografía de los efectos de la riada, obtenida a partir del tratamiento de la información multispectral captada por el sensor TM.

Figure 3a.— Mapping of the flood effects, obtained by processing multispectral data picked up by the TM sensor.

sión. La reflectancia es mayor en las áreas sin restos de árboles y disminuye a medida que la presencia de estos restos o de árboles en pie aumenta; también es baja en las áreas de erosión.

*Grupo B.* Constituido por cinco clases con una firma espectral muy parecida que conservan perfectamente el paralelismo entre ellas; únicamente la clase 14 que es la que posee los valores de reflectancia más elevados, presenta una respuesta algo distinta en la parte visible del espectro que la asemeja algo a las firmas del grupo A.

Este grupo corresponde a acumulaciones importantes de arenas con o sin restos de árboles y con o sin árboles; depósitos de poco espesor de arenas; campos agrícolas desnudos de vegetación y cubiertos de un manto de varios centímetros de limos; áreas con gran cantidad de árboles, destruidos o no, que han sido fuertemente afectados por la riada, presentándose ocasionalmente importantes acumulaciones de arenas.

En resumen, el grupo B identifica áreas de acumulación de arenas con o sin árboles destruidos, limos en campos desnudos y áreas arboladas muy afectadas. La reflectancia es mayor para las acumulaciones de arenas (clases 14, 7 y 3); así la clase 14 representa únicamente arenas con espesor importante, pudiendo llegar casi a 1 m. Recuérdese que esta clase posee una firma algo similar a las del grupo A. Las clases correspondientes a limos (15 y 4) presentan menor reflectancia.

Por su grado de reflectancia y por su correspondencia temática se puede dividir este grupo en los subgrupos B1 (clases 14, 7 y 3) y B2 (clases 15 y 4).

*Subgrupo B1.* Corresponde a arenas, principalmente, aunque la clase 3 identifica también algunas superficies cubiertas de limos.

*Subgrupo B2.* Identifica nítidamente a limos y a áreas de vegetación fuertemente afectada por la riada en las que se producen depósitos de arenas; en realidad la respuesta espectral proviene, en estas áreas, del recubrimiento de limos que presentan los restos vegetales, y las arenas quedarían ocultas bajo esta pantalla formada por los restos de árboles.

*Grupo C.* Reúne clases con firmas espectrales claramente distintas de las de los otros grupos y que a pesar de mostrar diferencias notables en los canales 4 y 5 presentan una respuesta es-

pectral similar en la región visible del espectro.

Este grupo corresponde claramente a las formaciones vegetales. Dado que la clasificación de estas formaciones no entra dentro del ámbito de nuestro estudio, los datos de campo no suministraron información sobre ella. Sin embargo, se pueden establecer algunas correspondencias a través de un examen de la fotografía aérea convencional tomada el día 14 de diciembre de 1982 que hemos utilizado en este estudio, aunque hay que tener presente que la información registrada por el satélite corresponde a unas semanas después, por lo que la vegetación pudo haber sufrido algunos cambios de estado entre las dos imágenes. A pesar de todo se pueden establecer algunas correlaciones entre las clases obtenidas automáticamente y las diversas formaciones vegetales que aparecen en las fotografías.

Así, por ejemplo, la clase 8 identifica campos de vegetación densa, claramente arbustiva, cuya altura debía ser del orden de 1 m y que por la respuesta en el canal 4 parece que se encontraba en un buen estado de vivacidad; podría tratarse de campos de maíz, frecuentes en esta zona.

Frutales y cultivos herbáceos son recogidos por las clases 2, 16 y 6, cuya reflectancia en los canales 4 y 5 es cada vez menor. La clase 6 identifica además la vegetación natural de ribera, la de áreas no cultivadas, de taludes, y también recoge plantaciones de árboles para extracción de madera (chopos), situadas en el lecho de inundación; cabe señalar que esta vegetación se encuentra desprovista de hojas por la época del año en que se encuentra. La clase 6, por fin, engloba también algunos campos que aparecen sin vegetación y cubiertos de limos en la fotografía aérea; por los datos de que disponemos no nos podemos explicar esta situación, a no ser que en el intervalo de tiempo comprendido entre las dos imágenes se produjera la emergencia de la vegetación.

En resumen, este grupo identifica formaciones vegetales que aunque se sitúan dentro de la zona inundada fueron afectadas muy poco o nada por la riada. Todas estas superficies están asociadas a depósitos de limos, si bien con sólo algunos centímetros de espesor. En algún caso, sobre todo para la vegetación natural próxima al río, los depósitos son de arena y presentan mayor espesor.

*Grupo D.* Contiene dos clases que presentan

unas firmas espectrales muy características por la gradual disminución de reflectancia que se da a medida que los canales espectrales se sitúan hacia longitudes de onda más largas del espectro.

Este grupo corresponde al agua. Los tramos más profundos del río se identifican por la clase 5 que presenta los valores más bajos de reflectancia. La clase 13, con valores más elevados, identifica tramos más anchos del río, con menor profundidad, así como cortos rápidos establecidos sobre lechos de grava; en ambos casos se produce una mayor reflectancia por el mismo lecho.

*Grupo E.* Contiene clases diversas que no se pueden incluir en ninguno de los grupos anteriores.

Cotejando la localización de los *pixels* que incorpora con la verdad terreno se llega a la conclusión de que se trata de clases que poseen *pixels* que comprenden áreas no homogéneas, a causa de la resolución de la información captada por el satélite.

Estos *pixels* impuros sólo aparecen nítidamente en la imagen cuando la superficie de un *pixel* abarca dos áreas de respuestas espectrales muy distintas, generándose entonces una respuesta nueva, totalmente distinta de las que corresponden a las clases puras. Este efecto se da, principalmente, en las orillas de agua, al combinarse la respuesta típica del agua con la proveniente de los depósitos de gravas o de la vegetación de ribera. Así, por ejemplo, la clase 17 corresponde con bastante exactitud a tramos del río con islas de gravas.

En el resultado final del tratamiento de la imagen (fig. 3a) hemos creído conveniente integrar las clases 17, 20 y 19 en el grupo D por describir mayormente espacios propios del río, mientras que la clase 9 ha sido incorporada al grupo C por comprender principalmente áreas con vegetación de ribera.

Finalmente, a consecuencia de las similitudes temáticas establecidas con la ayuda del estudio de campo, el agrupamiento original efectuado a partir de la semejanza espectral fue ligeramente modificado y se decidieron de manera definitiva los siguientes grupos:

Grupo	Clases	Tipo de suelo
A'	12, 11, 10, 18	«Gravas»
B'1	14, 7, 3	«Arenas»
B'2	15, 4	«Limos»
C'	8, 2, 16, 9, 6	«Vegetación»
D'	5, 13, 17, 20, 19	«Agua»

En la figura 3b los grupos «limos» y «vegetación» han sido reunidos en uno solo a fin de facilitar la comparación de esta imagen con la cartografía de campo (figura 1). Las diferencias observables entre los contornos de los grupos que se han mantenido invariables en las figura 3a y en la figura 3b son debidas a que las dos representaciones cartográficas han sido filtradas, por separado, a fin de mejorar su lectura.

## CONTROL DE RESULTADOS

Para conocer la exactitud y la validez del estudio realizado y, consecuentemente, la adecuación de la información captada por el satélite para detectar los efectos de una inundación, se ha efectuado una evaluación cuantitativa de la efectividad con que la información multiespectral puede diferenciar las distintas cubiertas existentes, tras la riada, en el terreno.

Para ello se ha procedido, en primer lugar, a la elección de un conjunto de pequeñas áreas, representativas de los tres tipos de cubiertas cartografiadas en el estudio de campo (gravas, arenas y limos), y de otras situadas en el cauce del río. Como base de información para la elección de estas áreas de control se ha usado la contenida en el estudio de campo, el cual ha permitido escoger y digitalizar sobre la representación de la imagen por la pantalla gráfica, estas áreas representativas de la diversidad presente en la zona estudiada. De esta forma se ha construido el archivo que corresponde a la «verdad terreno» que se ha usado para controlar el resultado de la clasificación.

En una segunda etapa se ha efectuado la comparación entre este archivo de la «verdad terreno» y el resultado de la clasificación automática, una vez realizada la identificación de las clases espectrales y la constitución de los grupos. Con el fin de que existiese correspondencia entre los grupos diferenciados en ambos archivos, los grupos B'2 y C' fueron reunidos en uno solo. Esta agrupación no es en modo alguno arbitraria pues, como ya ha sido expuesto en la descripción del grupo C, la vegetación presente en el área de inundación corresponde, en su mayor parte, a áreas con depósitos de limos.

La comparación entre el archivo de la «verdad terreno» y el de la clasificación multiespectral se ha realizado de manera automática

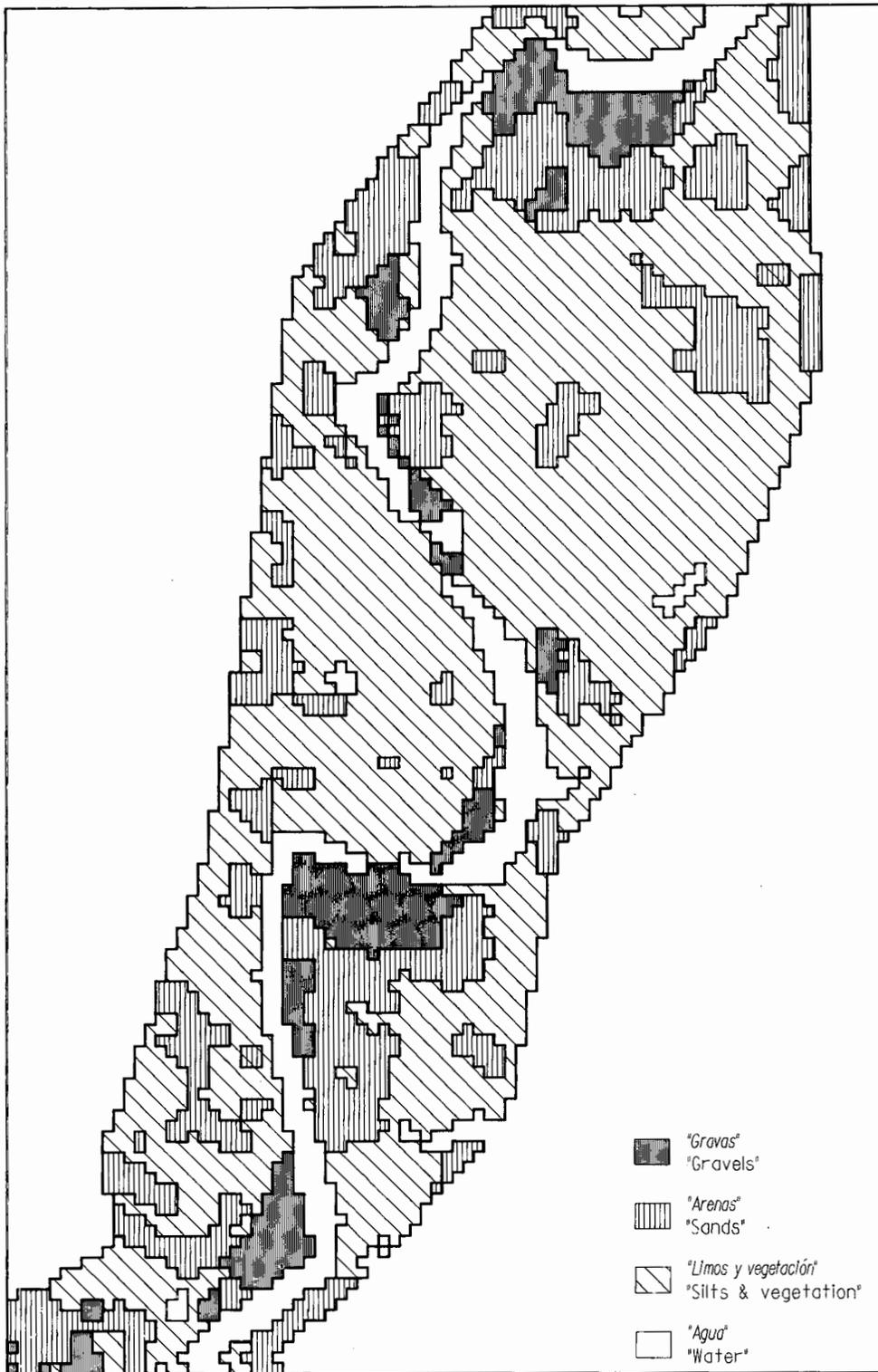


Figura 3b. — Cartografía de los efectos de la riada, obtenida a partir del tratamiento de la información multi-espectral captada por el sensor.

Figure 3b. — Mapping of the flood effects, obtained by processing multispectral data picked up by the TM sensor.

mediante un programa del sistema RS. Este programa compara para cada *pixel* contenido en las áreas digitalizadas la asignación que se le ha hecho en los dos archivos y genera, como resultado, una matriz de coincidencias y de confusiones entre grupos.

La tabla II corresponde a la matriz generada. En las columnas se indican los tipos de suelo o cubiertas reales, derivadas del estudio de campo, y en las líneas, los grupos o cubiertas a las que han sido asignados los *pixels* por el tratamiento informático realizado; en la tabla 1.<sup>a</sup> los resultados se expresan en valores absolutos (n.º de *pixels*) y en la 2.<sup>a</sup>, en porcentajes. así pues, vemos por ejemplo que de los 611 *pixels* controlados como pertenecientes al tipo Limos, 547 (89.5 %) han sido detectados como tales, mientras que 53 (8.7 %) han sido clasificados como arenas, 9 (1.5 %) como agua, y 2 (0.3 %) como gravas.

Como se puede observar en esta tabla, la detección y diferenciación de los tipos cubiertas considerados es muy aceptable excepto para el grupo de las arenas, en el que el 30 % de sus *pixels* son detectados como pertenecientes al grupo de los limos y vegetación. Este hecho, sin embargo, no se produce por una confusión sino, como ya se ha expuesto anteriormente, por la presencia de algunas zonas de acumulación de arenas en áreas en que una cubierta de vegetación con limos las enmascara.

## CONCLUSIONES

La utilización de la información multispectral captada por el sensor TM del satélite LANDSAT, ha permitido detectar los efectos de la crecida del río Segre acaecida a finales de 1982.

Estos efectos se pueden observar directamente en las imágenes obtenidas con determinados canales del sensor. De esta forma, la formación de una representación en falso color por superposición de las obtenidas con los canales 1, 2 y 4, ha permitido apreciar estos efectos con la nitidez suficiente como para poder delimitar la superficie inundada, aún a pesar de que los datos fuesen registrados después de dos meses de la riada.

Por otra parte, con el tratamiento numérico de esta información se han llegado a diferenciar distintos tipos de depósitos o acumulaciones con notable precisión, así como las superficies de agua y las ocupadas por vegetación. Las áreas cubiertas de vegetación han provocado, sin embargo, algunas confusiones dependiendo tanto del estado de los vegetales como del estado que presentaban como consecuencia de la riada.

En definitiva, el hecho de que de una manera general ha sido posible la detección y diferenciación de los distintos depósitos de materiales

Tabla II.—Matriz de coincidencias expresada en valores absolutos (número de *pixels*) y en porcentajes.

Table II.—Agreement matrix in absolute values (number of *pixels*) and percentages.

				VERDAD TERRENO		SOIL TRUTH	
				arenas	limos	agua	gravas
				sands	silts	water	gravels
CLASIFICACION AUTOMATICA AUTOMATIC CLASSIFICATION	B'1	arenas	sands	92	53	0	6
	B'2 + C'	limos + veget.	silts + veget.	46	547	4	7
	D'	agua	water	0	9	65	2
	A'	gravas	gravels	14	2	0	89
				152	611	69	104
CLASIFICACION AUTOMATICA AUTOMATIC CLASSIFICATION	B'1	arenas	sands	60.5	8.7	0.0	5.8
	B'2 + C'	limos + veget.	silts + veget	30.3	89.5	5.8	6.7
	D'	agua	water	0.0	1.5	94.2	1.9
	A'	gravas	gravels	9.2	0.3	0.0	85.6
				100	100	100	100

arrastrados por la avenida, permite considerar a estas imágenes como un tipo de información a tener en cuenta en el futuro. De esta forma, se podrán tener registrados y, por lo tanto, se podrán estudiar fenómenos que afecten a grandes extensiones, de las características del tratado, aun cuando no se hayan podido efectuar en su momento estudios de campo en todas las áreas afectadas.

#### BIBLIOGRAFIA

- ARBIOL, R., PALA, V., VINAS, O. (1983): Aplicación RS, Manual del sistema, Manual del usuario I y II. Barcelona, Centre de Càlcul de la Universitat Politècnica de Catalunya. Inédito.
- CALVET, J. (1983): Dinàmica a la Conca Baixa del Segre (des de Sant Llorenç de Montgai fins al riu Ebre) in: Efectes geomorfològics dels aiguats del novembre de 1982, 197-236, Barcelona, Servei Geològic, Generalitat de Catalunya.

Recibido, octubre 1985.