

Interpretación de imágenes LANDSAT-5 (TM) en la diferenciación de unidades fisiográficas homogéneas en Ciudad Rodrigo (Salamanca)

E. Santos-Francés¹; M. Zúñiga y J.A. Sánchez²

(1) Departamento de Edafología. Facultad de Farmacia
Universidad de Salamanca

(2) Departamento de Biología Vegetal. Facultad de Biología
Universidad de Salamanca

RESUMEN

El método de trabajo utilizado en la presente comunicación ha consistido en el análisis de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7, obtenidas por el sensor Thematic Mapper (TM); interpretación visual de imágenes en falso color, obtenidas por la combinación de diferentes bandas; análisis de componentes principales y clasificación supervisada.

El estudio se realiza en un sector en el que se definen nueve unidades fisiográficas, homogéneas respecto a los principales parámetros del medio físico: litología, pendiente, suelos y vegetación.

La información se complementa con la obtenida mediante fotointerpretación, mapa geológico a escala 1:50.000, trabajo de campo (cartografía de vegetación y suelos), toma de muestras y análisis de suelos en el laboratorio.

SUMMARY

The method used in the present work consisted in the analysis of bands 1, 2, 3, 4, 5 and 7 obtained with the Thematic Mapper (TM) sensor; visual interpretation of false-colour images, obtained by the combination of different bands; principal component analysis, and supervised classification.

The study was carried out on a sector in which nine physiographic units are defined; these are homogeneous with respect to the main parameters of the physical medium: lithology, slope, soils and vegetation.

The information is completed with that obtained by photointerpretation, a geological map at 1:50,000 scale, field work (cartography of vegetation and soils), the collection of samples and analysis of soils in the laboratory.

Introducción

El perfil de un suelo no se puede apreciar en las fotos aéreas ni en las imágenes de satélite (Teledetección), solamente, con estas técnicas, podemos obtener información del horizonte más superficial del suelo. Pero, además, es bien conocido que las clasificaciones de suelos están basadas principalmente en los horizontes internos o subsuperficiales, como son el argílico, cámbico, espódico, cálcico, etc. y, mediante ellos, los suelos son clasificados como Luvisoles, Cambisoles, Podzoles, etc.

Por lo tanto, la metodología que se debe emplear para realizar una cartografía básica de suelos ha de basarse necesariamente, no en la caracterización de los diferentes perfiles de suelos de una determinada región, sino en la diferenciación de unidades fisiográficas o de paisaje, homogéneas respecto a los principales parámetros del medio físico (litología, relieve, edad de las superficies geomorfológicas, vegetación, etc.), puesto que los límites de separación entre los diferentes suelos tienden a coincidir con los límites geográficos impuestos por los cambios en uno o en varios de sus factores formadores, los cuales coinciden con los parámetros del medio físico citados anteriormente. El cartógrafo debe esforzarse en descubrir las relaciones que existen entre el suelo y el paisaje con objeto de realizar con precisión las delineaciones, teniendo en cuenta que las líneas que delimitan las diferentes unidades fisiográficas suelen ser líneas de separación entre las diferentes unidades cartográficas de suelos.

Una vez diferenciadas las unidades de paisaje, las siguientes etapas que se deben realizar, dentro de esta metodología cartográfica diseñada por nosotros, consisten en hacer un inventario de suelos dentro de cada unidad, descripción de los perfiles de suelos más representativos, toma de muestras y análisis en el laboratorio.

Localización geográfica y geológica

La región objeto del presente estudio se encuentra situada al suroeste de la provincia de Salamanca, muy próxima a la frontera con Portugal (Fig. 1).

Desde el punto de vista geológico, en este sector se pueden diferenciar dos grandes unidades geológico-estructurales: la Fosa de Ciudad Rodrigo (materiales de edad Terciaria) y la Zona Centroibérica del Macizo Ibérico (materiales paleozoicos), según la división adoptada en el Mapa Tectónico de la Península y Baleares (Julivert et al., 1974).

Interpretación de imágenes LANDSAT-5 (TM) en la diferenciación de unidades fisiográficas homogéneas en Ciudad Rodrigo (Salamanca)

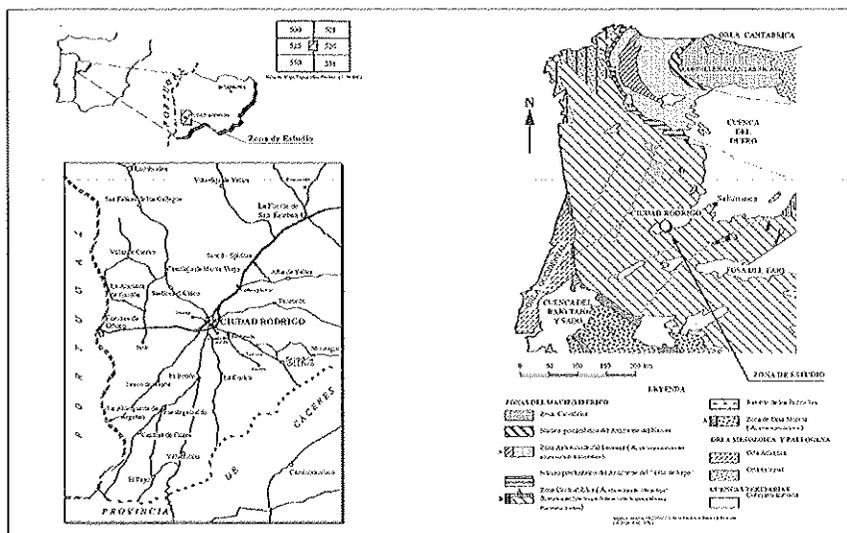


FIGURA 1
Localización geográfica y geológica

La Fosa de Ciudad Rodrigo es una subcuenca asociada a la gran Cuenca del Duero. Se trata de una depresión tectónica alargada, formada por el hundimiento de grandes bloques del basamento paleozoico como consecuencia de fracturas producidas durante el plegamiento alpino, que atraviesa la provincia de Salamanca en dirección NE-SO, desde la capital hasta la frontera portuguesa, adentrándose unos kilómetros en el vecino país. Todo el conjunto sedimentario terciario que rellena la Fosa de Ciudad Rodrigo está en posición horizontal o subhorizontal y presenta un fuerte carácter detrítico (areniscas, gravas, arenas, etc.).

En los bordes de la fosa afloran materiales paleozoicos, afectados por el plegamiento hercínico y pertenecientes a la Zona Centroibérica. Desde el punto de vista estratigráfico, esta zona se caracteriza, dentro del sector estudiado, por la presencia de pizarras (rocas metamórficas de edad Precámbrico-Cámbrico Inferior, pertenecientes al "Complejo Esquisto Grauváquico") y cuarcitas "américanas" (de edad Ordovícico).

Los materiales más modernos que completan el cuadro litoestratigráfico de esta región son los depósitos de terrazas fluviales, coluviales y aluviales recientes, de edad Cuaternario, que se han depositado en las laderas montañosas y en los valles de los cursos fluviales.

Material y métodos

La imagen elegida corresponde a una subescena de 512 x 512 pixels, pertenecientes a la órbita 203-32, 2º cuadrante, de fecha 8 de Noviembre de 1991.

El método de trabajo utilizado ha consistido en el análisis de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7, obtenidas por el sensor Thematic Mapper (TM); realización de diferentes procesos de realce y mejora de las imágenes; interpretación visual mediante la combinación de diferentes bandas (falso color); operaciones aritméticas (resta y división) de canales espectrales; análisis de componentes principales y clasificación supervisada.

La distribución de las diferentes unidades litológicas, de suelos y de vegetación se ha determinado, previamente, mediante fotointerpretación a escala 1:30.000; con los mapas geológicos a escala 1:50.000, correspondientes a Ciudad Rodrigo y Serradilla del Arroyo, hojas 525 y 526 del I.T.G.E.; con un intenso trabajo de campo, toma de muestras y análisis de suelos en el laboratorio.

Los suelos se han clasificado según las taxonomías de la FAO (1988) y norteamericana (Soil Survey Staff, 1975).

Análisis de combinaciones de bandas (falso color) y descripción de las unidades fisiográficas

Se han seleccionado tres combinaciones lineales de bandas (falsos colores) por ser, a partir de ellas, de las que se ha obtenido una mayor información al realizar un detallado análisis visual. Se trata de las combinaciones (4, 3, 2); (5, 4, 3) y (7, 5, 3), a las que asignamos los colores rojo, verde y azul, respectivamente. En estas imágenes se aprecian los principales rasgos del medio físico (litología, relieve, vegetación, suelos, etc.) de las unidades fisiográficas identificadas (Bordás, 1993), los cuales se describen a continuación (Fig. 2):

Zona de cumbres en las sierras de Torralba y Peronilla

Los afloramientos de cuarcitas (Ordovícico) originan unos resaltes o crestones continuos, que se suelen denominar "cuerdas". Estos materiales geológicos se encuentran formando estratos que están dispuestos con una fuerte inclinación o buzamiento e incluso verticales.

Los suelos tienen un espesor y un grado de desarrollo muy pequeño, siendo los más frecuentes los Leptosoles líticodísticos (según la clasificación de la FAO) o los Xerorthents líticos (según la clasificación norteamericana). Estos suelos tienen un epipedon de color pardo o pardo oscuro, de textura franca o francoarenosa, con abun-

Interpretación de imágenes LANDSAT-5 (TM) en la diferenciación de unidades fisiográficas homogéneas en Ciudad Rodrigo (Salamanca)

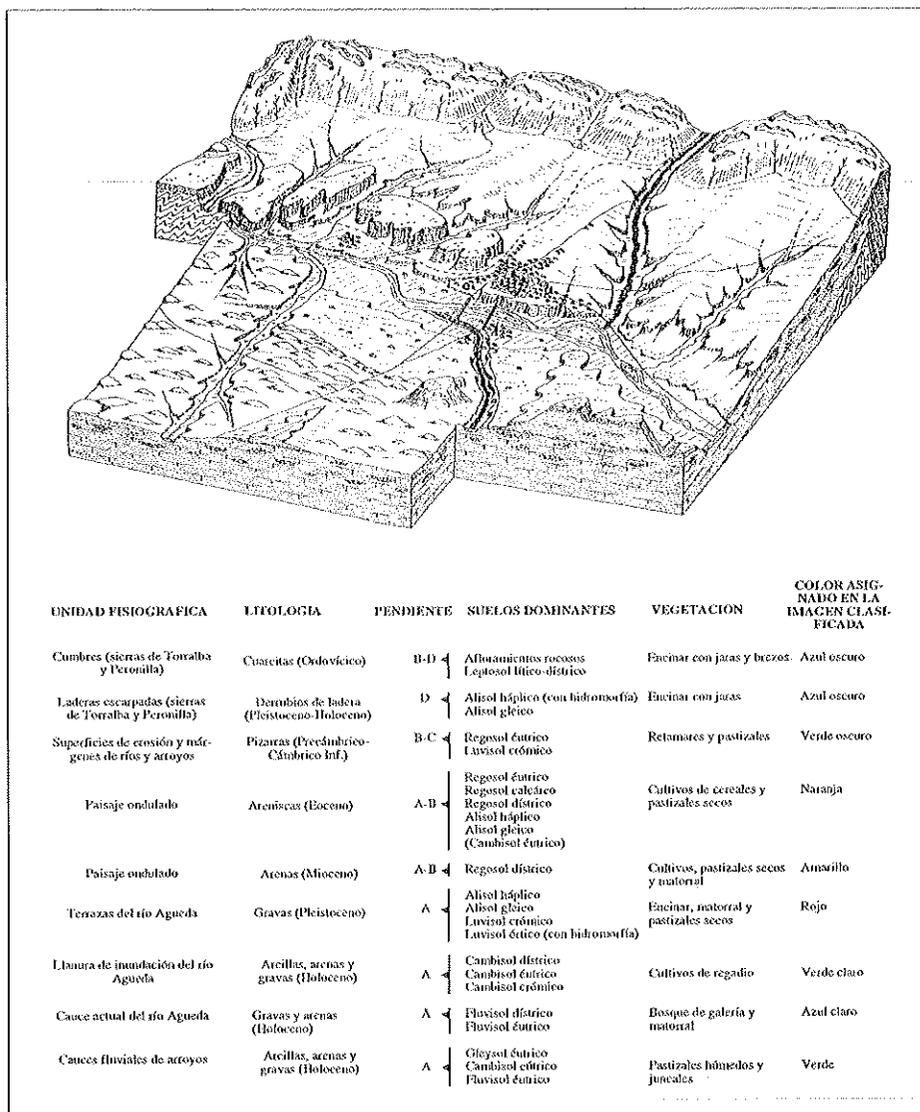


FIGURA 2
Bloque diagrama de la zona estudiada y principales características de las unidades fisiográficas identificadas

dantes fragmentos rocosos, constituidos por gravas, piedras y bloques de cuarcitas angulosas. El contenido en materia orgánica es alto, el pH es ácido (4.9) y el grado de saturación bajo (18%).

La vegetación está formada por encinares (*Quercus rotundifolia*) que, ocasionalmente, van acompañados de quejigos (*Quercus faginea*) y un matorral de jarales y brezales (Fig. 3).

En las combinaciones de bandas (5, 4, 3) y (7, 5, 3) los roquedos de cuarcitas (suelos desnudos) que están situados en esta zona de cumbres se distinguen perfectamente por tener los tonos más claros. Sin embargo, en la combinación (4, 3, 2) no se diferencian apenas las cumbres y las laderas de las sierras de Torralba y Peronilla (Imágenes 1 y 2).

Laderas escarpadas de las sierras de Torralba y Peronilla

Los frentes de sierra o superficies con fuertes pendientes (inclinadas y moderadamente escarpadas) que rodean a los afloramientos de cuarcitas, están recubiertos por

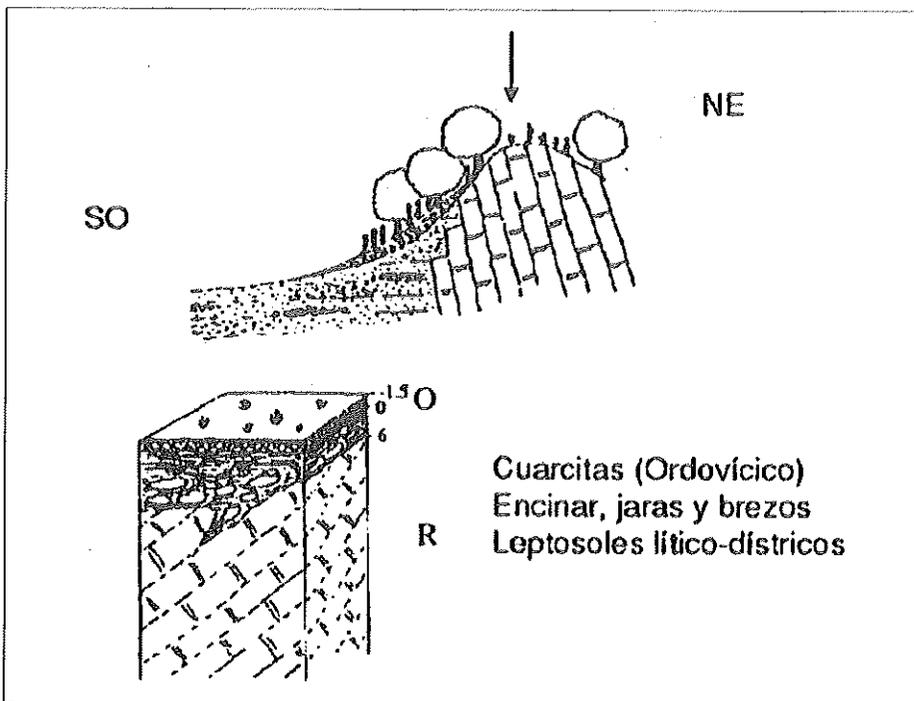


FIGURA 3
Cumbres de las sierras de Torralba y Peronilla

un manto de derrubios de ladera formado por cantos angulosos de cuarcitas, unidos por una matriz más fina, generalmente arenosa, y con un espesor que varía desde decenas de centímetros a varios metros. Dicho derrubio, unas veces se asienta sobre las cuarcitas del Ordovícico y otras, generalmente en la parte baja de la ladera, sobre areniscas del Terciario.

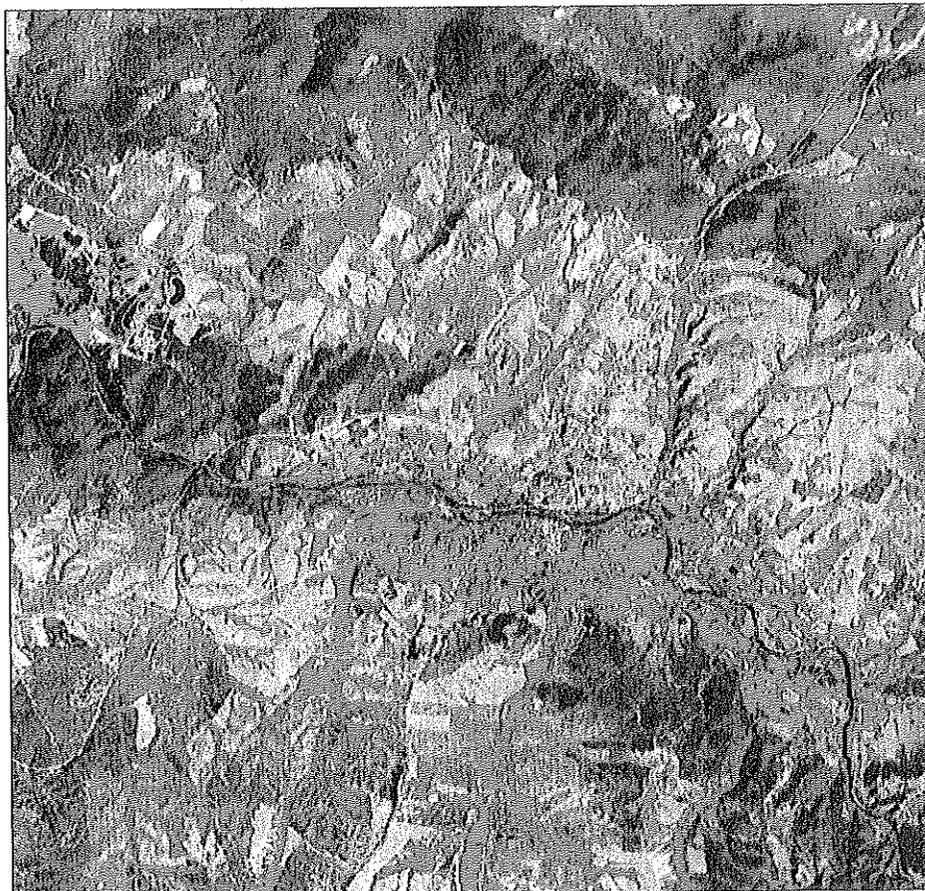


IMAGEN 1

Composición en falso color de las bandas 4 (rojo), 3 (verde)
y 2 (azul) de Landsat-5 (TM). (A. 86)



IMAGEN 2

Composición en falso color de las bandas 5 (rojo), 4 (verde)
y 3 (azul) de Landsat-5 (TM). (A. 87)

La edafización de estos depósitos de ladera ha supuesto la formación de unos suelos de gran espesor, de color rojo, pedregosos y con abundantes fragmentos rocosos. Son dominantes los Alisoles háplicos y gleicos (Palexeralfs últicos y típicos). Todos estos suelos tienen un horizonte superficial de unos 40 cm de espesor, de color pardo y textura francoarcillosa. El horizonte argílico tiene un espesor del orden del metro, es de color rojo a rojoamarillento y textura arcillo-arenosa. El subhorizonte inferior (50 cm de espesor) tiene propiedades hidromórficas (Btg), es de color gris y amarillopálido, con manchas rojas y arcilloso. El horizonte 2C está constituido por areniscas grisverdosas, con manchas amarillentas (Eoceno-Oligoceno). El contenido en materia orgánica en el horizonte superficial es alto, el porcentaje de arcilla aumenta con la profundidad (desde

el 16 al 60%), el pH decrece desde el 5.5 en superficie hasta el 4.5 en el horizonte C y el grado de saturación varía entre el 37 y el 96% (Fig. 4).

Esta unidad fisiográfica, cubierta por una vegetación constituida por encinares (*Quercus rotundifolia*) y un matorral de jaras (*Cistus ladanifer*), aparece en tonos muy oscuros (valores espectrales bajos) en las diferentes combinaciones de bandas -p. ej: de color rojo oscuro en la (4, 3, 2) y verde oscuro en la (5, 4, 3) y (7, 5, 3)-.

Superficies de erosión y márgenes de ríos y arroyos, sobre pizarras

Las pizarras pertenecientes al Complejo Esquisto Grauváquico (Precámbrico-Cámbrico Inferior) afloran en los cuadrantes noroeste y sureste del sector estudiado,

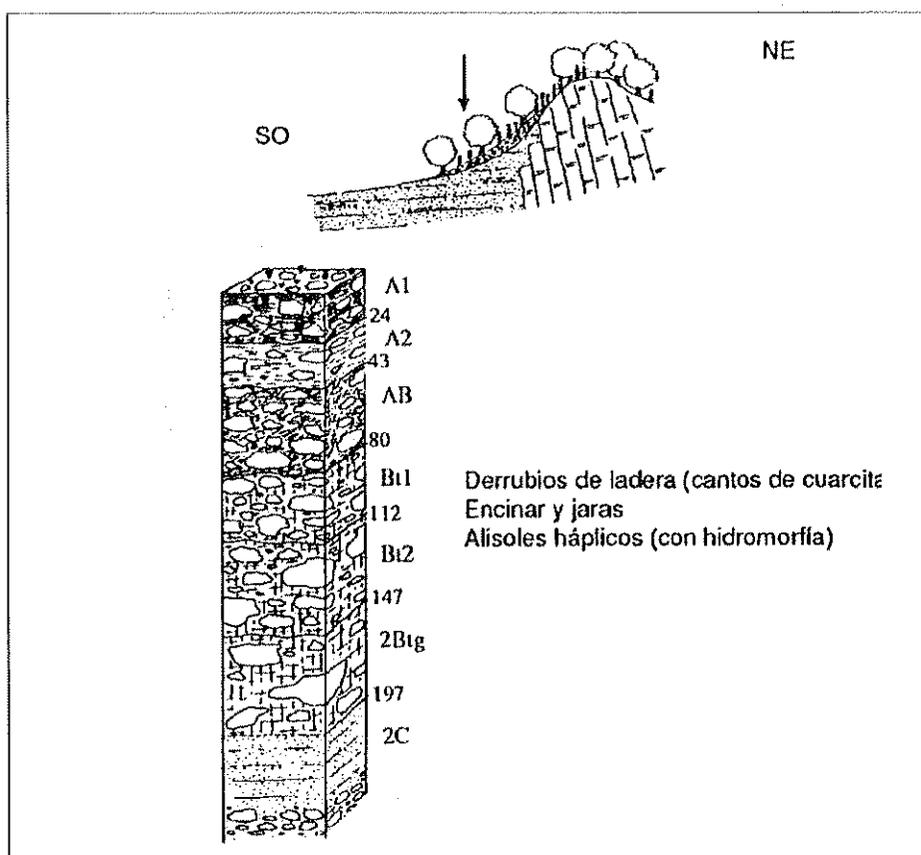


FIGURA 4
Laderas escarpadas de las sierras de Torralba y Peronilla

en las vertientes inclinadas del río Agueda, en la mina de Saelices y en las márgenes de pequeños arroyos. Estas vertientes se han formado debido al encajamiento de la red fluvial y la erosión de las areniscas sobreyacentes del Terciario.

En esta unidad fisiográfica generalmente la roca se encuentra muy cerca de la superficie, debajo de una delgada capa de suelo (epipedon ócrico) de pequeño espesor y los afloramientos rocosos o roquedos de pizarras solamente se localizan en áreas de fuertes pendientes, preferentemente en las márgenes del río.

Los suelos predominantes son los Regosoles éutricos (Fig. 5) y Leptosoles lítico-éutricos. También se han observado Luvisoles crómicos, aunque solamente formado inclusiones.

Los Leptosoles poseen un horizonte A de pequeño espesor (menor de 10 cm), de color pardo o pardo-grisáceo, con textura entre franca y franco-limosa y con abundante fragmentos rocosos. El horizonte inferior está constituido por pizarras compactas y duras (horizonte R), pero es muy frecuente que esta roca esté parcialmente alterada y que posea una consistencia blanda (horizonte C), sobre la que se han desarrollado Regosoles éutricos (Xerorthents típicos). Por lo general, estos suelos tienen un pH ligeramente ácido (5.0) y están saturados en bases.

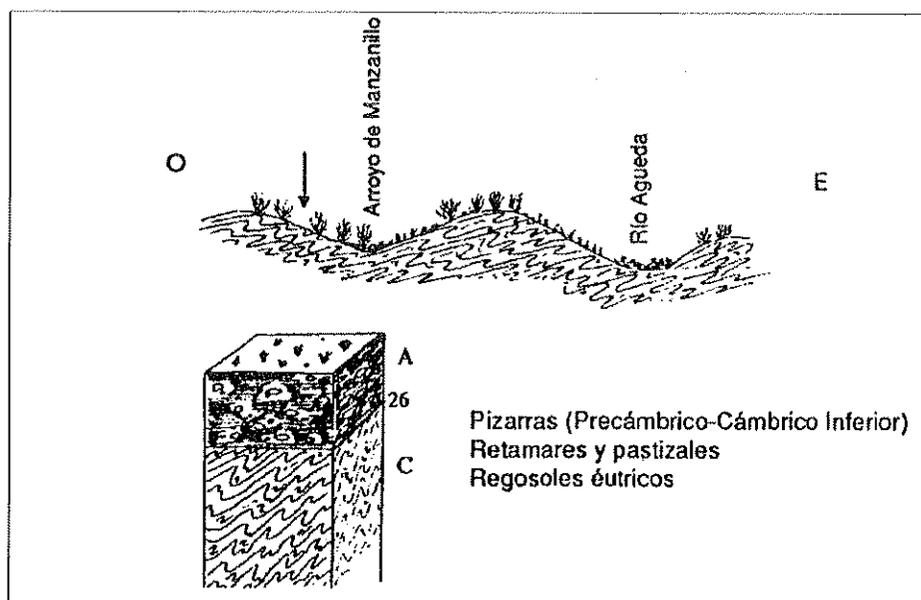


FIGURA 5
Superficies de erosión y márgenes de ríos y arroyos

La vegetación dominante de esta unidad fisiográfica está constituida por retamares (*Retama sphaerocarpa*), acompañada de *Cytisus scoparius* y *Thymus mastichina* y una gran abundancia de pastizales naturales, mayoritariamente, secos (*Tuberarion*) y húmedos (*Cynosurium*), en situación de vaguada, por lo que el principal uso al que se dedican estos suelos es al ganadero.

Las pizarras que están situadas en zonas más o menos llanas y cubiertas por una pequeña capa de suelo y pastizales no se diferencian bien, en las diferentes combinaciones en falso color, de las unidades limítrofes que poseen la misma vegetación. En cambio, se distinguen mejor los afloramientos rocosos, situados en las márgenes del río Agueda, en áreas con fuertes pendientes. Estos roquedos aparecen con tonalidad oscura, bien de color rojo o verde según la combinación de bandas de que se trate. Las pizarras que forman las escombreras en la mina de Saclices son las que mejor se diferencian mediante las imágenes de Teledetección, ya que aparecen con tonalidad azul en la combinación (4, 3, 2) y violeta en la (7, 5, 3).

También, se ha analizado la combinación entre cocientes de bandas (3/5, 4/3, 7/4), aunque el análisis de esta imagen no añade una mayor información a la ya obtenida con las anteriores combinaciones, pero, sin embargo, en ella se destaca con mucha nitidez (tonalidad roja sobre un fondo azul-verdoso) las ya citadas pizarras, con alto contenido en uranio, de la mina de Saclices.

Paisaje ligeramente ondulado, sobre areniscas del Eoceno

Estas areniscas forman una serie de superficies antiguas, ligeramente inclinadas, a modo de glacis, que descienden desde las sierras de Torralba y Peronilla. En otras zonas, como en las proximidades de Ciudad Rodrigo y al sur del Agueda, forma una serie de mesetas, con superficies más o menos llanas, interrumpidas por pequeños valles que originan una serie de laderas inclinadas, dando lugar, así, a un paisaje ligeramente ondulado.

El carácter más llamativo de este área es la abundancia de suelos poco evolucionados (Regosoles), no calcáreos y calcáreos, con textura arenosa y no pedregosos. Solamente en las superficies más antiguas (glacis) existen suelos con mayor desarrollo (Alisoles).

Los Regosoles presentan diferentes tipologías: eútricos, calcáreos y dístricos (Xerorthents típicos y dístricos). Se trata de suelos que poseen una pequeña retención de agua utilizable, por lo que la sección control de humedad está seca durante gran parte del año.

El horizonte Ap suele ser de color pardo-amarillento a pardo oscuro y textura franco-arenosa o arenosa-franca. El horizonte inferior (C) está constituido por las areniscas de grano grueso, con cuarzo y feldespatos, de color gris-oliva, con manchas

pardo-amarillentas (herrumbrosas). En estos suelos el contenido de carbono orgánico es moderado (1.6%) y el pH es ligeramente ácido (6.0).

Sobre areniscas de grano fino, en la margen izquierda del arroyo de San Giraldo, los Regosoles son calcáreos, tienen carbonatos pulverulentos introducidos entre las grietas y planos de estratificación de las areniscas amarillentas (horizonte C), el pH es ligeramente básico (7.8) y están saturados en bases.

Los Alisoles háplicos (Haploxeralfs típicos) tienen un horizonte superficial de color pardo-rojizo y textura franco-arenosa. El horizonte Bt tiene entre 20 y 30 cm de espesor, es de color pardo-rojizo o rojo-amarillento y textura franco-arcillosa o arcillo-arenosa. En algunos lugares la parte inferior del horizonte argílico posee propiedades hidromórficas (Btg). El horizonte C está constituido por areniscas pardo-amarillentas, con manchas verdosas o por arenisca de color gris-oliva (Fig. 6). El pH de estos suelos rojos varía entre 4.0 y 4.5 y tienen un grado de saturación comprendido entre el 13 y 58%.

La vegetación de esta zona está constituida por cultivos de secano (cebada, centeno y trigo). Las zonas no dedicadas a cultivo se encuentran ocupadas por majadales (*Poa-trifolion*) y pastizales agostantes (*Tuberarion*).

Esta unidad fisiográfica aparece con tonos muy claros (valores espectrales altos) en las diferentes combinaciones de bandas. En el falso color (5, 4, 3) los cultivos de secano tienen tonalidad rosada y, en cambio, los pastizales aparecen de color verde-amarillento.

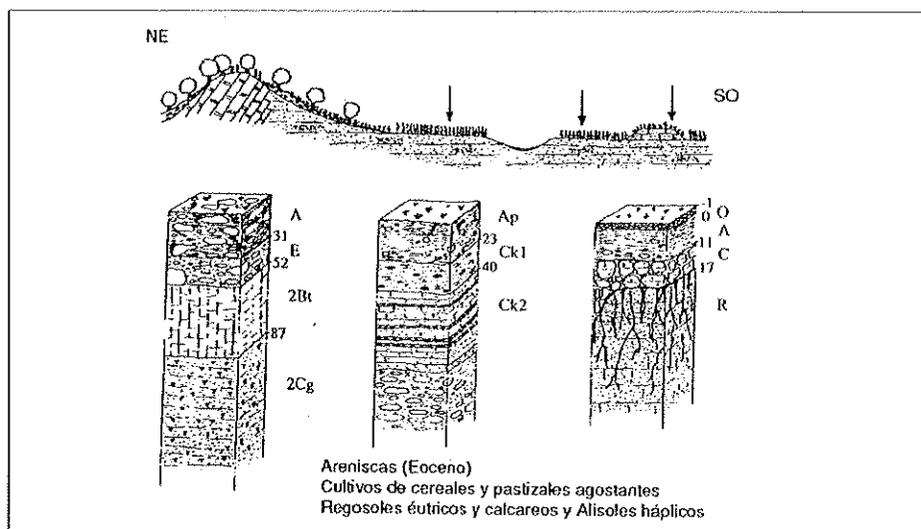


FIGURA 6
Paisaje ondulado

Paisaje ligeramente ondulado, sobre arenas y gravas del Mioceno

Estos materiales geológicos afloran al sur de la zona estudiada, formando una serie de superficies convexas, disectadas por algunos arroyos y regatos que originan una serie de laderas más o menos inclinadas y un paisaje ligeramente ondulado, muy parecido al de la unidad fisiográfica anterior.

En este sector predominan los Regosoles dísticos, cuyas características generales son las siguientes: color pardo claro; textura arenosa; poco contenido de materia orgánica; no son pedregosos, aunque en las zonas donde afloran las gravas en superficie, éstas provocan una moderada pedregosidad; poseen una baja saturación en bases; pH ácido (5.4) y la retención de agua utilizable por las plantas es muy pequeña, por lo que la sección control de humedad está seca durante gran parte del año. El horizonte C está constituido por arenas de cuarzo, de grano grueso.

En algunas áreas (p.e: en los alrededores de Carpio de Azaba) estos suelos son utilizados para el cultivo agrícola de cereales de secano, pero en otras, debido a su bajo rendimiento agrícola, han sido abandonados desde hace varios años y actualmente poseen un matorral de retamas (*Cytisus multiflorus*), cantuesos (*Lavandula pedunculata* y *Lavandula sampaiana*) y pastizales vi-vaces xerofíticos (*Hieracio-Plantaginion*). La retama blanca generalmente está acompañada por dos elementos endémicos que se presentan con una abundancia digna de resaltar, como son *Digitalis thapsi* y *Carduus carpetanus* (Fig. 7).

Esta unidad de paisaje aparece en las tres combinaciones en falso color con tonos claros, aunque algo más oscuros que la unidad anterior. No obstante, en el cuadrante suroeste de la zona aparecen unos encinares adhesados que se diferencian perfectamente por tener una tonalidad rojo oscura en la combinación (4, 3, 2) y verde oscura en la (5, 4, 3) y (7, 5, 3).

Terrazas del río Agueda

Se pueden diferenciar cuatro niveles principales de terrazas, escalonadas a diferente altitud, que han sido depositadas por el río Agueda. Todas ellas forman una serie de superficies de erosión, llanas y originadas en diferentes periodos de tiempo (durante el Pleistoceno).

Los depósitos de terrazas están constituidos por gravas y piedras, con cantos redondeados de cuarcitas, con un espesor que varía desde varios decímetros a unos 3 metros.

Los suelos desarrollados sobre las terrazas del río Agueda tienen una morfología y unas propiedades que son muy diferentes respecto al resto de los suelos de todo el sector estudiado.

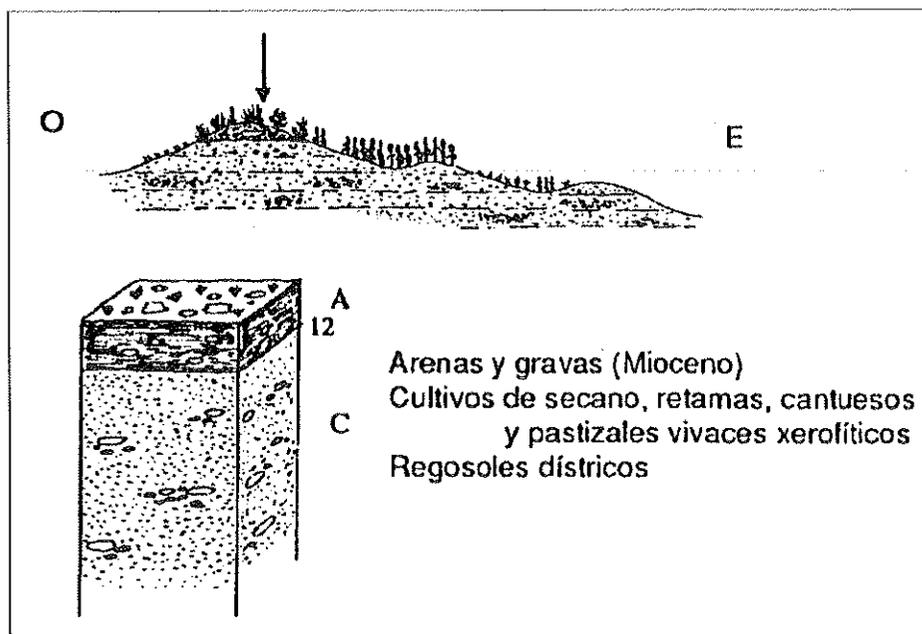


FIGURA 7
Paisaje ligeramente ondulado

La terraza más antigua del río Agueda (80 m) está constituida por abundantísimos cantos de tamaño piedra, bloques y gravas, de cuarcitas y cuarzo, originando un terreno totalmente pavimentado de piedras. Sobre esta terraza antigua (Pleistoceno inferior o medio) se han desarrollado Alisoles háplicos y gleicos (Palexerulf) constituidos por un horizonte eluvial en superficie, con textura franco-arenosa y bajo contenido en materia orgánica; un horizonte Bt de color rojo y arcilloso. Estos suelos tienen un grado de saturación y una capacidad de cambio muy bajos y el pH es ácido (entre 3.8 y 4.5).

En las terrazas intermedias y bajas se han descrito suelos con un horizonte argílico arcilloso, de color pardo-rojizo a rojo o amarillento y con pocos cutanes de iluviación. Se trata de Luvisoles crómicos y órticos (Haploxeralfs típico) que tienen un horizonte Ap de color pardo, con textura franco-arenosa, bajo contenido en materia orgánica y con abundantes gravas y piedras de cuarcitas. El grado de saturación y la capacidad de cambio son moderadamente altos y el pH es ligeramente ácido (entre 5.2 y 6.5).

La vegetación predominante sobre las terrazas está constituida por encinares con un matorral de retama albariña (*Cytisus multiflorus*) y majadales (Fig. 8).

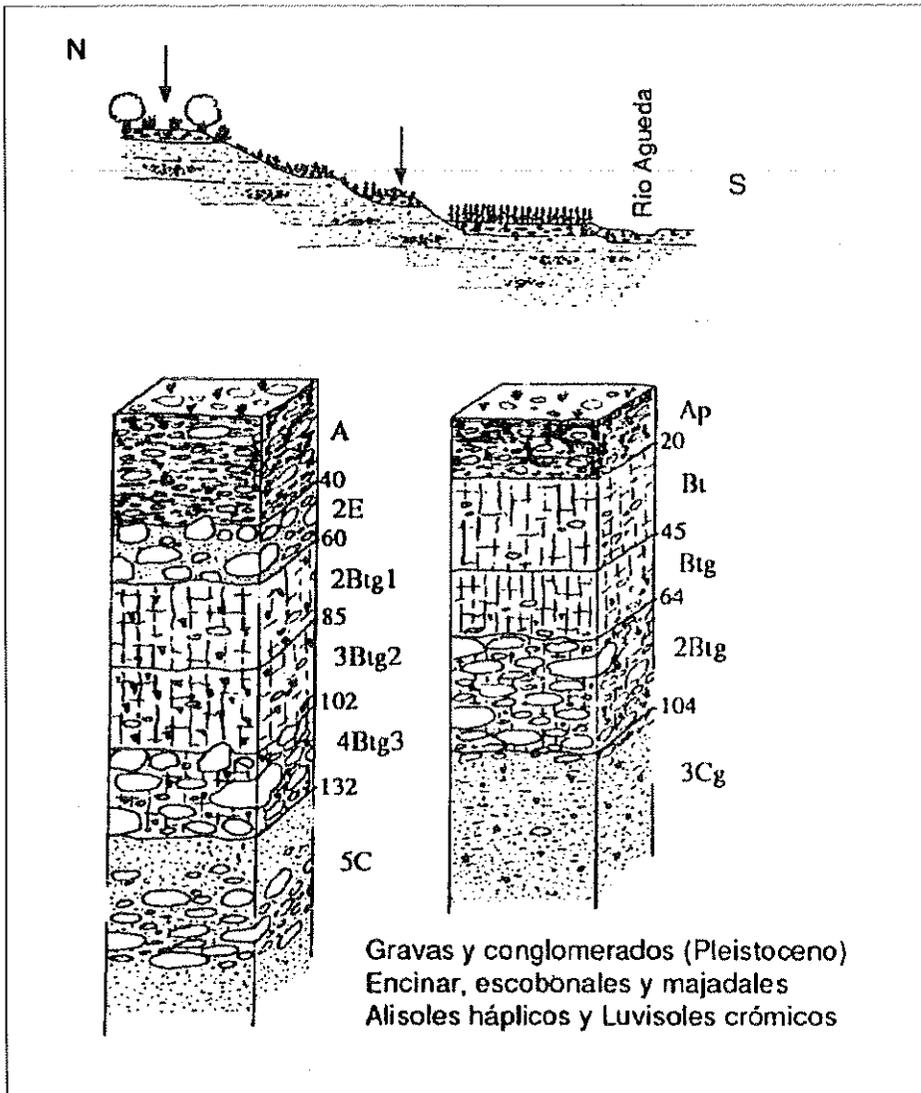


FIGURA 8
Terrazas del río Agueda

Las terrazas que están cubiertas, predominantemente, por encinares aparecen con tonos oscuros (rojo y verde) en las tres combinaciones en falso color.

Llanura de inundación del río Agueda

Los depósitos de la llanura de inundación o de la terraza inferior del río Agueda están formados por arenas, gravas y arcillas.

En este paisaje predominan los Cambisoles dístricos, crómicos y éutricos (Xerochrepts.dístricos y típicos), que tienen un horizonte Ap de color pardo oscuro a pardo y textura franca o franco-arenosa. El horizonte cámbico (Bw) es de color pardo o pardo-rojizo y franco-arenoso. El horizonte C está formado por una capa de gravas, en unos casos, y por un nivel de arenas-arcillosas de color pardo-amarillento, en otros. El grado de saturación y la capacidad de cambio son bajos a moderados y el pH ácido (4.5 - 5.0).

La vegetación existente sobre la llanura de inundación está formada casi exclusivamente por cultivos de regadío (remolacha, patata, girasol y maíz) y pequeñas parcelas dedicadas a cultivos hortícolas y barbechos. Las zonas más desfavorecidas edáficamente se dedican al cultivo de chopos (Fig. 9).

Esta unidad se diferencia perfectamente en todas las combinaciones de bandas, con un color rojo claro en la (4, 3, 2) y verde claro en la (5, 4, 3) y (7, 5, 3).

Cauce actual del río Agueda

Los depósitos del cauce actual del río Agueda están formados por arenas y gravas con cantos de naturaleza variable (cuarcitas, pizarras, etc.). Los suelos muestran la morfología y propiedades típicas de los Fluvisoles, es decir, la estratificación de diferentes materiales sueltos (arena, gravas, etc.) y la ausencia de organización edáfica que demuestran la existencia de procesos de sedimentación recientes.

Predominan los Fluvisoles éutricos y dístricos (Xerofluvents.típicos), cuyas características morfológicas principales son las siguientes: el horizonte superficial tiene un espesor de unos 15 ó 25 cm, es de color pardo, pardo-grisáceo o pardo-rojizo y la textura es franco-arenosa; el horizonte C está constituido, generalmente, por una alternancia de arenas de grano grueso de color pardo-amarillento, arenas finas de color gris, arcillas de color pardo-amarillento oscuro o pardo-rojizo y gravas con cantos de cuarzo y cuarcita y matriz arenosa (dentro de los niveles arenosos son frecuentes las lamelas de óxidos de hierro, de 1 a 3 mm de espesor). El grado de saturación y el pH varían entre el 5 y el 57% y entre 4.2 y 6.5, respectivamente.

Los suelos del cauce actual del río Agueda se utilizan para pastos y en el mismo borde del río se desarrolla el típico bosque de galería (alisedas). Los alisos (*Alnus*

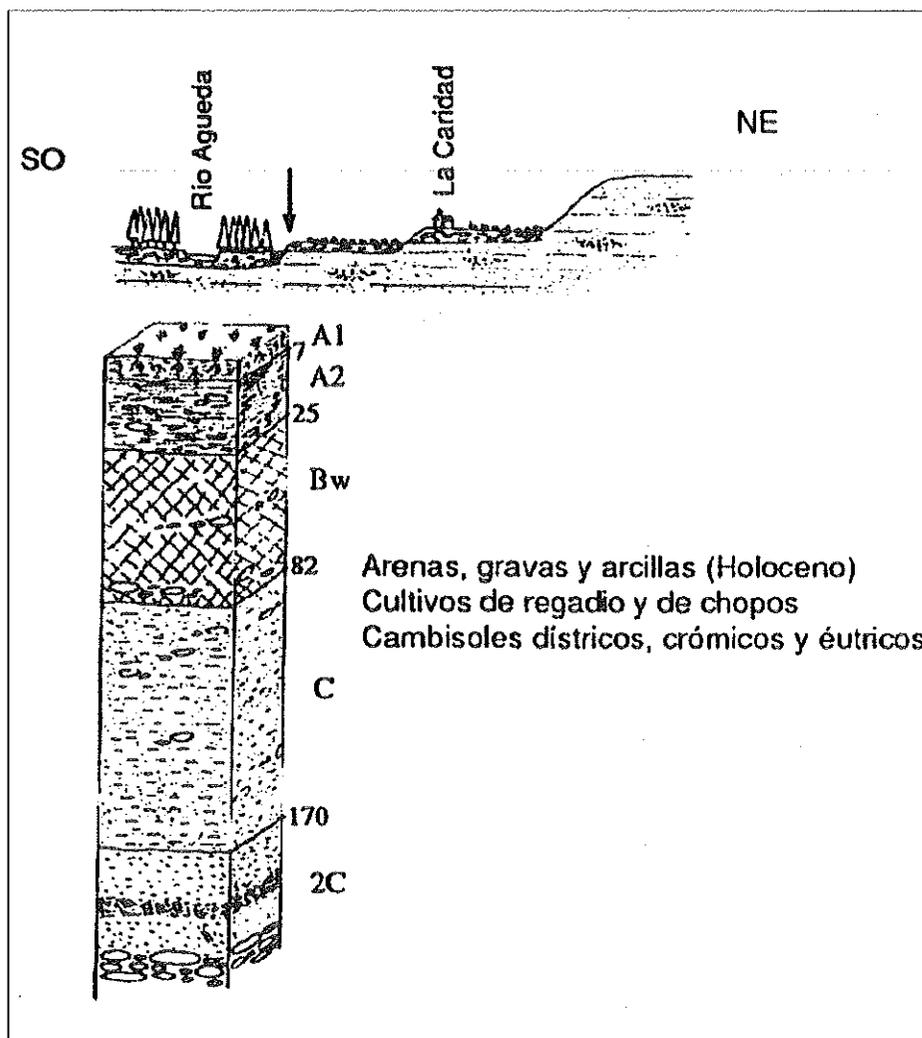


FIGURA 9
Llanura de inundación del río Agueda

glutinosa) enlazan catenalmente, según se produce un paulatino alejamiento del agua, primero con las poblaciones de sauces (*Salicetum lambertiano-salvifoliae*) y después con las de fresnos. Aunque con frecuencia, junto al río se mezclan alisos, chopos, arces, sauces y fresnos (Fig. 10).

El sotobosque de estas comunidades riparias es rico en especies de comunidades herbáceas de bordes de agua (*Phragmitetea*), de pastos húmedos (*Molinio- Arrhenat-heretea*) y de herbazales nitrófilos vivaces (*Artemisietea vulgaris*).

Esta unidad tiene una extensión muy reducida, puesto que se limita a las zonas más cóncavas de los meandros del río Agueda y, a pesar de ello, se distingue bastante bien en la combinación en falso color (7, 5, 3).

Cauces fluviales de pequeños arroyos

En los "fondos de valle" originados por los arroyos y regatos que discurren por la zona estudiada se han depositado sedimentos aluviales recientes, constituidos por gravas, arenas y arcillas con un espesor del orden de los 2 metros.

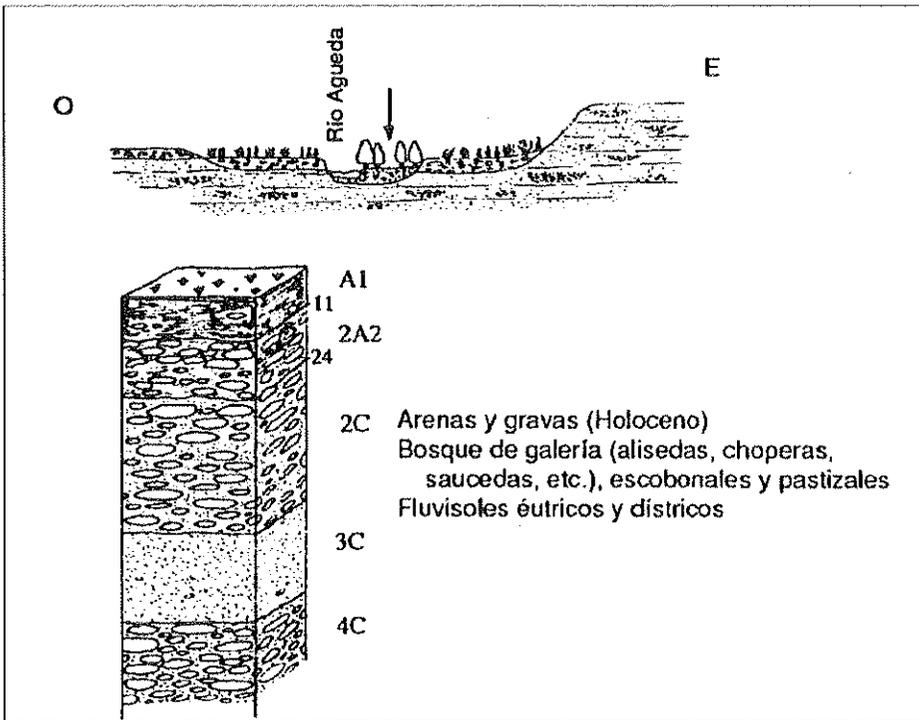


FIGURA 10
Cauce actual del río Agueda

Los suelos que se han desarrollado en estos cauces tienen una morfología y propiedades que son completamente diferentes con respecto a los suelos existentes en las unidades fisiográficas que se han descrito anteriormente. Generalmente poseen colores grises y manchas y nódulos negros, debidos a procesos de oxidación-reducción, por la presencia de un nivel freático muy cerca de la superficie del suelo. Por este mismo motivo, es decir, por la presencia de una elevada humedad edáfica, estos suelos son capaces de soportar una vegetación herbácea que constituye unos buenos y abundantes pastos húmedos y una vegetación típica de ribera (juncos, fresnos, chopos, etc.). En las proximidades de la desembocadura del arroyo de San Giraldo en el río Agueda los suelos son utilizados como cultivos de regadío, en pequeñas huertas.

Los suelos que predominan en esta unidad fisiográfica son los Gleysoles éútricos (Xerofluvents), con un horizonte A de color pardo oscuro, textura franco-arcillo-arenosa y moderado contenido en carbono orgánico (1.4%). El horizonte C está formado por una alternancia de arenas, gravas y arcillas, de color pardo-oliva y gris-oliva y con abundantes manchas de color pardo-amarillentas (herrumbrosas) y negras (óxidos de Fe), originadas por procesos de hidromorfía (Fig. 11). El pH de estos suelos varía desde ligeramente ácido (6.0) a ligeramente básico (8.0).

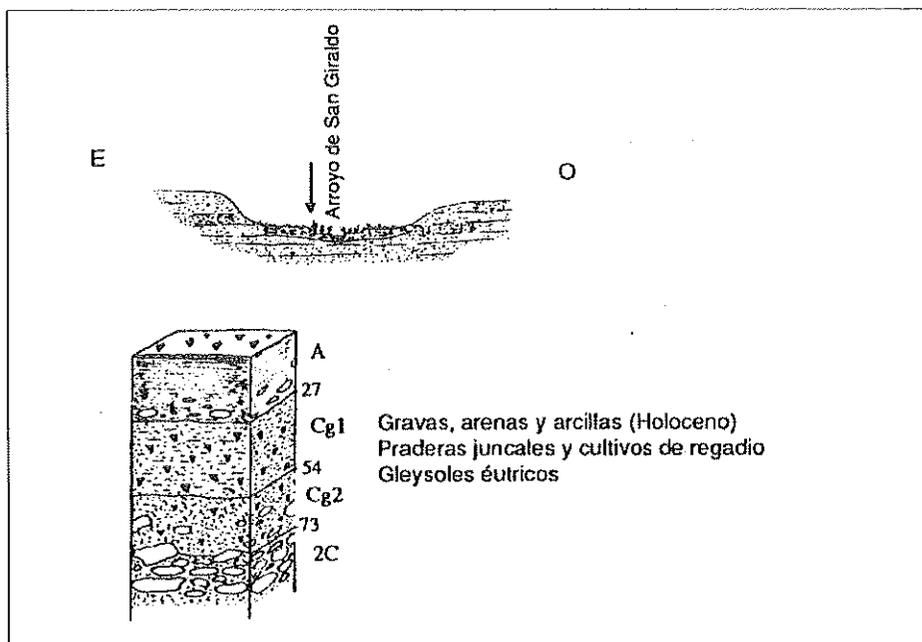


FIGURA 11
Cauces fluviales de pequeños arroyos

Esta unidad fisiográfica tiene una extensión superficial muy pequeña, pero por poseer una estructura lineal, suelos con una gran humedad y una vegetación constituida preferentemente por praderas juncuales, es por lo que se diferencia claramente en las combinaciones de bandas (4, 3, 2), con color rojo claro, y (7, 5, 3), con tonalidad verde clara.

Clasificación supervisada

Para realizar una clasificación supervisada, mediante el método de máxima probabilidad, con las bandas del TM (1, 2, 3, 4, 5 y 7), se han delimitado de forma precisa una serie de áreas de entrenamiento representativas de las diferentes clases espectrales, a partir del conocimiento que se tiene de la zona, previos estudios de fotointerpretación y campañas de campo (Imagen 3).

Conviene señalar, que en la zona de estudio existe una gran diversidad de litologías, suelos, vegetación natural y tipos de cultivos, lo que favorece la presencia de un alto porcentaje de píxeles mixtos que dan como resultado deficientes clasificaciones si solamente se utiliza la información espectral, exigiendo, por lo tanto, la incorporación de información temática con el fin de mejorar los resultados de la clasificación (Veronese, 1993).

Se han delimitado nueve clases, que corresponden con las unidades fisiográficas homogéneas definidas anteriormente, excepto las unidades correspondientes a las "cumbres de las sierras de Torralba y Peronilla" y a los "cauces fluviales de los arro-

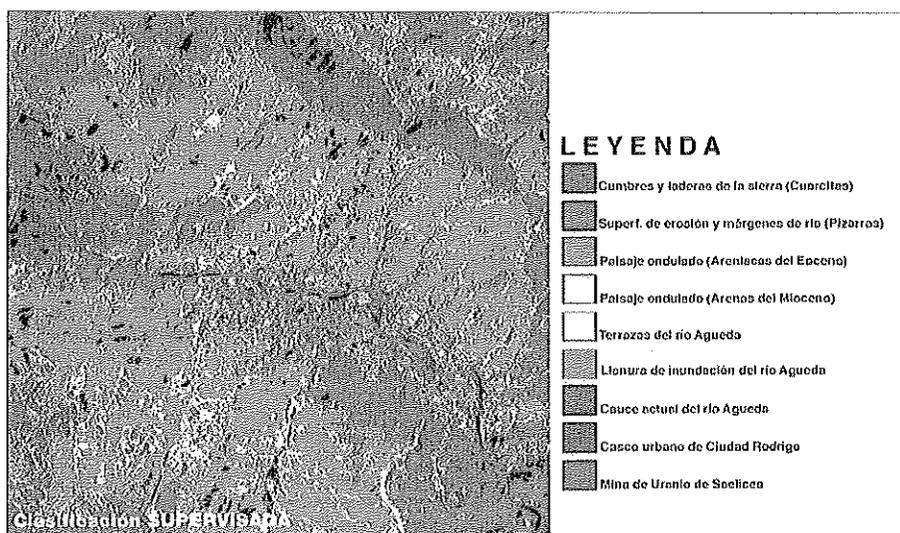


IMAGEN 3
Clasificación supervisada. (A. 88)

yos” que no se han diferenciado debido a que se presentan como estructuras lineales de pequeña extensión superficial y, por lo tanto, el número de pixels que se pueden seleccionar de ellas es muy pequeño y no llegan a alcanzar el mínimo exigido. Por el contrario, se han incluido dos clases también de pequeña extensión, pero que se diferencian bastante bien en el análisis visual de las diferentes bandas del sensor TM, como son la “mina de Saelices” y el “casco urbano de Ciudad Rodrigo”.

En el diagrama de firmas espectrales (Fig. 12) se puede apreciar que las clases consideradas en la clasificación alcanzan los máximos valores de reflectividad en las bandas TM1 de la región visible y TM5 del infrarrojo.

Para obtener una idea más clara del poder discriminante de cada uno de los canales TM que han sido utilizados en la clasificación y de los solapes existentes entre las distintas clases, se han construido las matrices de distancias espectrales de Fisher y los gráficos de dispersión espectral. Estos últimos, además, nos dan idea del nivel de superponibilidad entre las distintas clases para un canal determinado. Cabe resaltar un moderado grado de confusión entre las distintas unidades, como consecuencia del solapamiento que tienen lugar entre las respuestas espectrales de las mismas. Los canales con mayor poder discriminante son las bandas 2 y 5 del TM (Tablas 1 y 2).

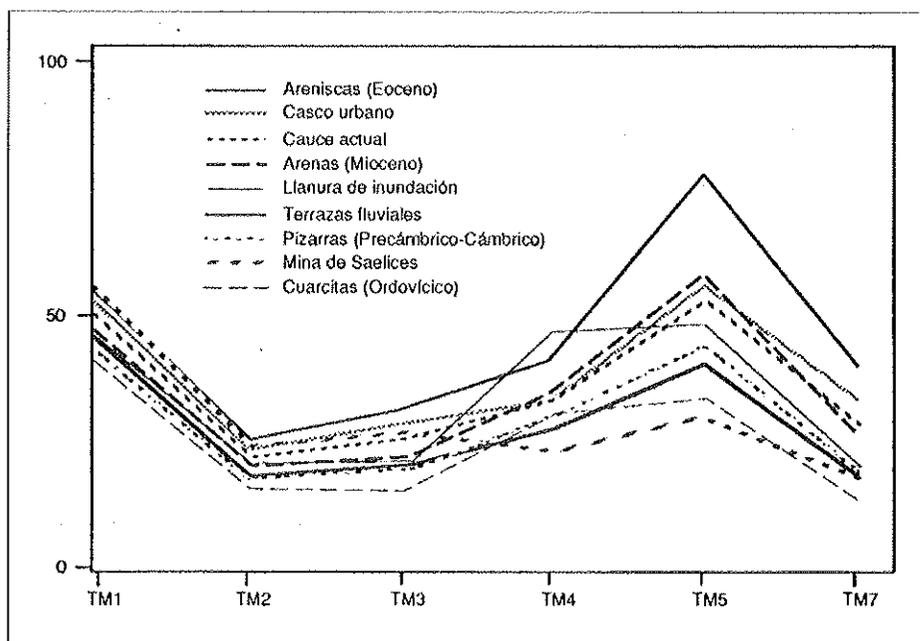


FIGURA 12
Signatura espectral de las clases consideradas en la clasificación

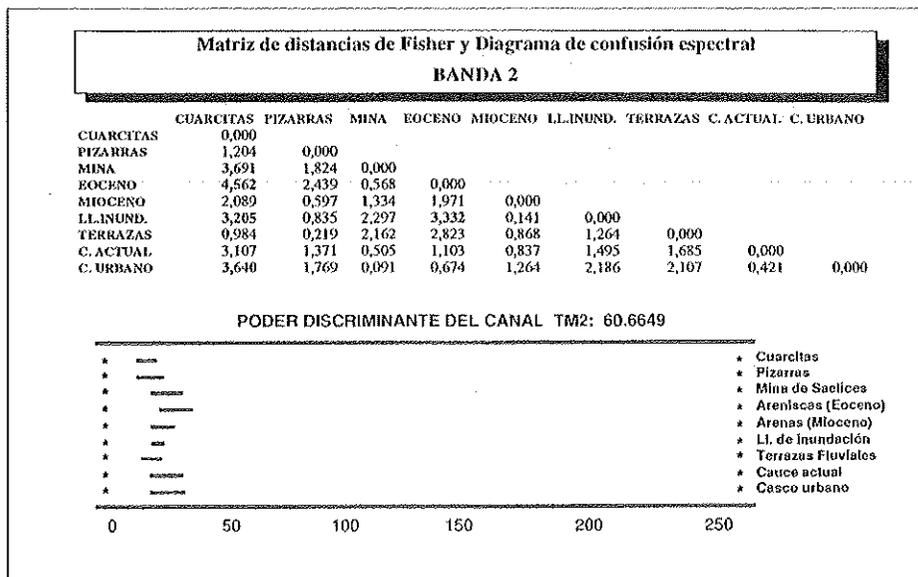


TABLA 1

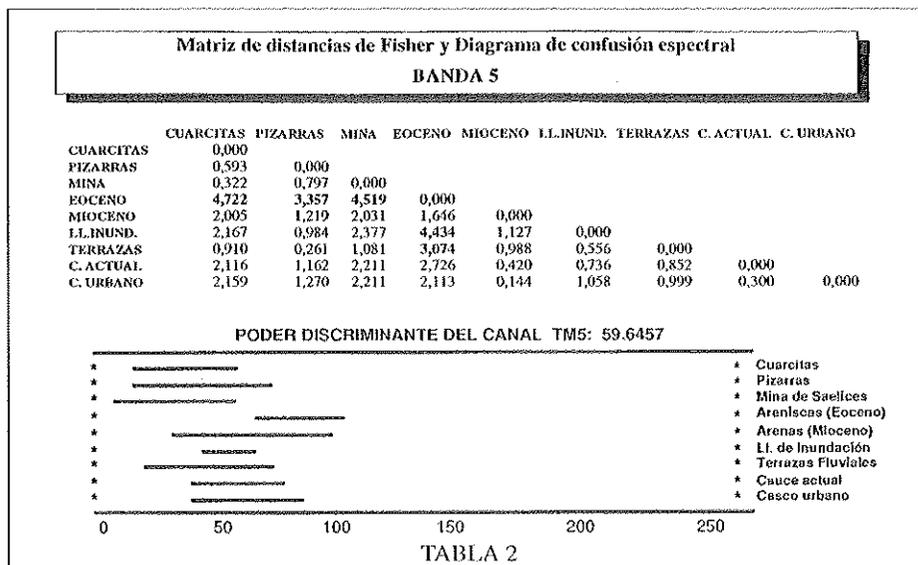


TABLA 2

Matriz de confusiones (Valores absolutos)										
	CUARCITAS	PIZARRAS	MINA	EOCENO	MIOCENO	LL.INUND.	TERRAZAS	C. ACTUAL	C. URBANO	TOTAL
CUARCITAS	2117	366	0	16	33	0	0	0	0	2696
PIZARRAS	2078	2548	376	509	406	4	0	0	0	6225
MINA	10	87	1061	41	14	0	0	0	0	1267
EOCENO	0	9	0	4141	193	0	0	0	0	4544
MIOCENO	969	1086	2	1692	452	12	0	0	0	4223
LL.INUND.	23	379	3	16	114	512	0	0	0	1134
TERRAZAS	1767	636	3	394	131	4	0	0	0	2937
C. ACTUAL	33	306	172	233	247	11	0	0	0	1008
C. URBANO	31	215	170	666	264	9	0	0	10	1375
TOTAL	7028	5632	1787	7708	1854	552	0	0	40	25409

TABLA 3

Los valores altos de la matriz de Fisher indican una buena separabilidad de las clases en el correspondiente canal. La mayor separabilidad se produce entre las cuarcitas (sierras de Torralba y Peronilla), la llanura de inundación del río Agueda y las areniscas del Eoceno.

La matriz de confusiones o coincidencias se ha realizado entre la imagen clasificada y otra imagen que corresponde a la realidad terreno, que en este caso se ha utilizado la imagen "máscara". En la Tabla 3 se puede apreciar que la mayor parte de los pixels de la clase cuarcitas se han clasificado como tales y un pequeño porcentaje se ha clasificado como pizarras. Las clases pertenecientes a la "mina de Saelices" y a las "areniscas del Eoceno" también han sido bien clasificadas. Las "arenas y gravas del Mioceno" ha sufrido una gran confusión y un gran número de pixels se han clasificado como pertenecientes a las clases: "areniscas del Eoceno", "pizarras" y "cuarcitas". La superficie ocupada por las pizarras se ha sobrevalorado por haber absorbido algunos pixels pertenecientes a la "llanura de inundación del río Agueda". De los 2.937 pixels considerados en la imagen realidad terreno como "terrazas del río Agueda", ninguno se ha clasificado como tal, la mayoría se han considerado dentro de la clase "cuarcitas". Lo mismo le ha ocurrido a los 1.008 pixels seleccionados de la clase "cauce actual del río Agueda".

Si tenemos en cuenta que los criterios "visuales" de interpretación de imágenes permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral parejo, aunque con un significado temático bien distinto (Chuvieco, 1990), es por lo que se deben de tener en cuenta estos criterios a la hora de resolver algunos problemas de delimitación de diferentes unidades que poseen una misma cobertura vegetal. Pues bien, en la zona estudiada la distinción digital de las unidades fisiográficas que poseen una vegetación constituida preferentemente por encinares es muy compleja, ya que los valores numéricos de estas unidades son muy similares, por lo que se producen una serie de confusiones en la clasificación. Por este motivo, se ha modificado la clasificación supervisada realizada anteriormente (Imagen 4), cambiando el color, de forma interac-

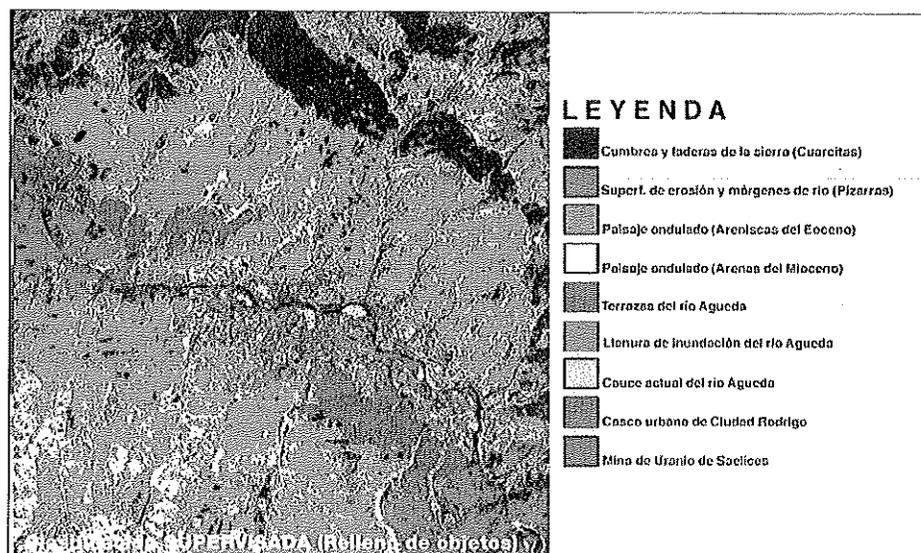


IMAGEN 4
Clasificación modificada

Se ha cambiado el color (Relleno de objetos) de algunas unidades fisiográficas. (A. 89)

tiva, de algunas áreas o regiones (Relleno de objetos) y, de esta manera, se ha conseguido una clasificación o cartografía automática mucho más acorde con la realidad del terreno. En la práctica, se ha procedido a colorear de rojo los pixels de las terrazas que se habían confundido como cuarcitas, de azul claro los depósitos aluviales del río Agueda, de rojo oscuro el casco urbano de Ciudad Rodrigo y de amarillo el encinar desarrollado sobre el Mioceno.

Análisis de componentes principales

Generalmente se emplea este tipo de análisis cuando la información es redundante y el volumen de datos retarda notablemente los procesos posteriores a realizar. Lo importante de este método es que un gran número de variables puede ser reemplazado por un pequeño número de componentes que expliquen la mayor parte de la varianza de datos (García et al., 1987).

Mediante esta técnica se ha construido la matriz de correlación, con la que se ha podido comprobar la elevada redundancia existente entre algunos canales del sensor TM y la matriz de carga de los componentes principales. También, se ha calculado que más del 97% de la varianza queda explicada por los tres primeros componentes y

que el primero tiene un enorme peso (82.6%). Finalmente, con las imágenes correspondientes a los tres primeros componentes principales se ha realizado una combinación en falso color (R, V, A), en la que aparece, en tonos verdes claros los cultivos de regadío, en verde algo más oscuro los pastizales húmedos y matorrales y en verde muy oscuro los encinares. El casco urbano de Ciudad Rodrigo y la mina de Saelices se presentan en tonalidad rójiza y los cultivos de secano y pastizales de color amarillo o pardo-rojizo.

Es interesante indicar que la interpretación de los componentes principales no nos ha proporcionado una información que pueda considerarse como muy útil y significativa para el objetivo propuesto en este trabajo y, por ello, se ha decidido no incluir en este apartado las imágenes y datos obtenidos con esta técnica.

Conclusiones

Las metodologías del análisis visual de bandas y clasificación supervisada, acompañadas con estudios de interpretación de fotografías aéreas, se pueden considerar como válidas y de una gran ayuda al edafólogo para la discriminación de unidades fisiográficas homogéneas, como paso previo para realizar una cartografía de suelos. Posteriormente, una vez delimitadas estas unidades, se debe proceder, en cada una de ellas, a realizar un inventario morfológico de suelos, descripción de perfiles, toma de muestras y análisis en el laboratorio.

También, es importante señalar que mediante la Teledetección se reduce, en un elevado porcentaje, el número de observaciones de suelos que es necesario realizar para delimitar con precisión las diferentes unidades cartográficas de suelos.

Bibliografía

- Bordás Valls, V.:** 1993. Caracterización y cartografía de sectores y unidades ambientales discriminadas a partir de información del sensor (TM.) del Landsat-5 en la comarca del valle de Ayora-Cofrentes. En *"Teledetección y Medio Ambiente"*, pag. 134-139. Edit. J.M. Moreira. Sevilla.
- Chuvieco Salinero, E.:** 1990. *Fundamentos de Teledetección espacial*. Edit. Rialp. Madrid.
- FAO:** 1988. Soil map of the world. Revised legend. *World Soil Resources*. Report 60, FAO. Roma.
- García, E.; Bradshaw, R.P. y Ocaña, M.C.:** 1987. Análisis de los usos del suelo en la depresión de Antequera mediante la utilización del TM. En *"Comunicaciones de la I Reunión Científica del Grupo de Trabajo de Teledetección"*, pag. 31-50. Edit. Clotet y Solé. (Barcelona).
- Instituto Tecnológico Geominero de España.:** 1990. Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 525 (Ciudad Rodrigo).
- Instituto Tecnológico Geominero de España.:** 1990. Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 526 (Serradilla del Arroyo).
- Julivert, M.; Fontboté, J. M.; Riveiro, A. y CONDE, L.:** 1974. Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares y Memoria explicativa. *Serv. Publ. Ministerio de Industria. I.G.M.E.* Madrid.

Soil Survey Staff: 1975. Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Agriculture Handbook No. 436*. U. S. Government Printing Office, Washington.

Veroneses, V. y Mather, P.M.: 1993. Improving land-cover classification by incorporation of map information. A study in Andalusia (Spain). En *"Teledetección y Medio Ambiente"*, pag. 193-200. Edit. J.M. Moreira (Sevilla).