

EVALUACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT TM PARA LA DISCRIMINACIÓN LITOLÓGICA EN EL ÁREA DE ALCANTARILLA (MURCIA)

M.T. YOUNIS¹, J. MELIA², J. BASTIDA¹ y S. GANDIA².
¹ Dpto. de Geología, ² Dpto. de Termodinámica.
Universitat de Valencia, Valencia.

RESUMEN

El área de estudio está localizada aproximadamente a 10 Km al oeste de la ciudad de Murcia en el SE de España. Geológicamente está formada por diferentes unidades litológicas sedimentarias y volcánicas del Neógeno y por una cobertura cuaternaria. Se han utilizado medidas de reflectancia espectral en el suelo así como análisis de muestras con difracción por rayos X. Los datos de reflectancia espectral han sido usados como guía para seleccionar los cocientes de bandas del sensor TM que maximizan la discriminación de determinados tipos de litología sobre la base de su mineralogía respectiva. Los cocientes de bandas TM 5/7, 3/1 o 3/2, 7/4, 1/4, 1/5, 1/7 permiten obtener una clara información sobre el contenido del suelo en arcilla y hierro. Otra técnica de realce utilizada ha sido la transformación de componentes principales. La composición en falso color de las bandas 2, 5, 7 como RGB permite la identificación de diferentes unidades y estructuras litológicas. Han sido identificadas superficies de yeso ya conocidas y detectadas nuevas superficies que no se mencionan en el mapa geológico básico. Por otra parte las unidades margosas se diferencian de las calizas y calcarenitas debido al contenido en minerales arcillosos de las margas, que provocan la absorción en la banda TM7. La composición en falso color de las bandas 7, 5 y 3 ha resultado útil para la discriminación de sedimentos con hierro en areniscas y arcillas rojas de depósitos del Cuaternario y para discriminar dos tipos de basaltos en las intrusiones de cuerpo volcánico.

ABSTRACT

The studied area is situated in Mula Basin, about 10 Km to the West of Murcia, SE Spain. Geologically, it is formed by different lithologic units and Neogene volcanics with a quaternary cover. Radiometric measurements have been performed on the lithological units whose mineralogical compositions have been tested by X-ray diffraction. Various false colour combination for the discrimination and mapping of the different lithological studied units. Other enhancement techniques were applied such as the principal component analysis which have been served to delineate and enhance the discrimination among the studied lithological units.

1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1. Situación geográfica.

El área para el estudio de la desertificación (zonas training y test) se localiza en el SE de España (provincia de Murcia), correspondiente a las hojas, a escala 1:50.000, nº912 (Mula) y 933 (Alcantarilla), del Servicio Geográfico Nacional. Se halla comprendida entre las localidades de Alcantarilla y Mula.

1.2. Localización litológica y estructural.

La zona de estudio se encuentra ubicada en el sector oriental

de las cordilleras béticas, (Figura 1) las cuales forman parte del segmento septentrional del cinturón alpino europeo. Desde el punto de vista estructural, la región se puede dividir en dos dominios, las zonas externas y las internas, diferenciadas por su evolución paleogeográfica y tectono-metamórfica. Sobre estas unidades aparecen unos materiales de relleno a favor de unas cuencas post-mantos, desde el Mioceno superior, que aparecen por esfuerzos ligados a régimen transcurrente (Montenat, 1977; Ott d'Estevou y Montenat, 1985). La zona queda recogida en los mapas geológicos a escala 1:50.000, números 912 y 933.

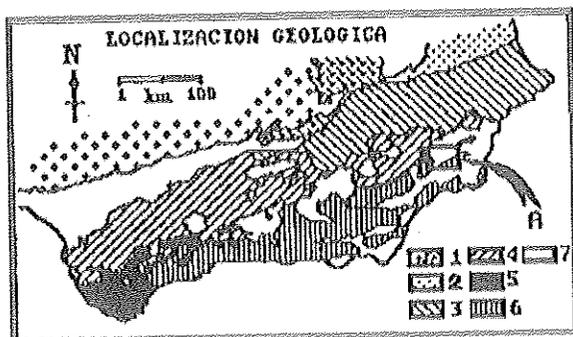


Figura 1.- Esquema estructural de las Cordilleras Béticas. 1. Mesa Ibérica y covertera. 2. Dominio Ibérico. 3. Prebético. 4. Subbético y Penibético. 5. 'Dominio de flysh'. 6. Zonas internas. 7. Neógeno post-mantos. A. Área de estudio. (Modificado de Azema et al., 1979).

Las Zonas Internas se dividen clásicamente en tres complejos estructurales que, por orden ascendente, son:

- Complejo Nevado-Filábride.
- Complejo Alpujarride.
- Complejo Maláguide.

De ellos, sólo los dos últimos quedan representados en la zona de trabajo.

El complejo Alpujarride está bien representado en Sierra de Carrascoy (Kampschur, 1972), en la que se diferencian tres unidades (unidades de Romero, Carrascoy y Pestillos). Están constituidos por carbonatos y pelitas de edad Permo-Trías.

El complejo Maláguide aparece en Sierra Espuña y Sierra de Carrascoy. Están constituidas por dos unidades, una inferior paleozoica, escasamente metamorfolizada, que corresponde con el basamento y una superior mesozoica y paleógena que forma la covertera, en la que dominan las facies continentales de "red beds".

Las Zonas Externas están formadas por rocas ígneas y sedimentarias de edad Triásico-Mioceno inferior, dispuestas sobre el basamento hercínico del macizo ibérico. Dicha zona puede dividirse en dos subzonas, Prebético y Subbético, de las que existe representación para la segunda en nuestra zona, representada por dos unidades:

- Unidad de Manzanete, que aflora en la Sierra de Manzanete, litológicamente constituida por dolomías y calizas del Lias.
- Unidad de Mula, de las que afloran en esta zona, margas, lutitas y areniscas del Eoceno-Oligoceno, de todo el conjunto Senonense-Mioceno inferior.

Las unidades Post-manto se distribuyen desde el Mioceno superior a la actualidad, de las que se pueden hacer diferencias entre el Neógeno y el Cuaternario.

Los materiales del Neógeno (aquí Tortoniense-Plioceno) del SE de España, están depositados en unas cuencas con una paleografía intramontañosa limitadas islas y corredores. Los depósitos están representados por margas (yesíferas o no), calcarenitas, yesos, materiales terrígenos de diferente granulometría (en ocasiones de colores rojos) y rocas volcánicas.

El Cuaternario está constituido fundamentalmente por arcillas, arenas y conglomerados, además de construcciones y costras calcáreas (caliches, espeleotemas y travertinos) de menor extensión. Los materiales terrígenos son de naturaleza cuarcítica, carbonática y dolerítica (heredados de los complejos Alpujarride y Maláguide); de carbonatos y areniscas (de las zonas externas); de carbonatos, margas, arcillas, conglomerados y yesos (del Neógeno). Estos depósitos se presentan con morfologías de abanicos fluviales (Alhama de Murcia, vertiente norte y oeste de la Sierra de Carrascoy), así como en forma de terrazas fluviales (relacionadas con los cursos de los ríos próximos a Alcantarilla y Mula). Otros depósitos con morfologías de glaciares se encuentran en la zona de Fuente Librilla-Barqueros.

2. CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS POR RADIOMETRÍA IN SITU Y ANÁLISIS DE RAYOS-X

2.1. Localización de los puntos de muestreo con la descripción geológica.

Las unidades litológicas en la zona de interés del estudio se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Puntos de muestreo de las unidades litológicas en el área de estudio.

Código Muestra	Litología	Unidad geológica
1-Barqueros 1 (R1)	lanprolitas rojas	V7
2-Barqueros 2 (D1)	lanprolitas oscuras	T Bc/12
3-Alcantarilla (L1)	Yeso	T Bc3 Y11
4-Alhama 1 (A2)	Calizas brechíferas	T(Bc1-Bc2/11-11)
5-Alhama 2 (Q1)	Lutitas yesíferas	Q
6-Alhama 3 (A1)	Margas	T G3
7-Alhama 4 (B1)	Margas	T Bc3m/11
8-Govar (G1)	Calcarenitas	T(Bc3/11)
9-Pliogo 1 (P1)	Margas y areniscas	T (A-Bb/3-1)
10-Pliogo 2 (P3)	Calizas nummulit.	T (A-Bb/3-1)
11-Librilla (S1)	Deiríticos rojos	T(Bc/C12)
12-Pliogo 3 (P2)	Areniscas y margas	TA-Bb/(3-1)

2.2. Análisis por difracción por rayos-X.

La composición mineralógica de las diferentes litologías de las unidades representadas en la Tabla 2 se han determinadas por análisis de difracción de rayos-X.

Las condiciones estándar de barrido en el difractor Siemens D500 fueron, 40Kv, 20mA, 1°, 0,15, CuK α 1. Para la adquisición de datos de rayos-X, modelos de evaluación e identificación de minerales, se ha empleado el sistema

Tabla 2.- Efectos de absorción teóricos y análisis de difracción de rayos-X en las distintas muestras.

Muestra	Efectos de Absorción (µm)	Composición Mineralógica	Espaciado d_{hkl} característico
A1	0.43, 0.63, 0.9, 1.45, 1.94, 2.22, 2.34, 2.45	Arcillas, Cuarzo	4.26, 4.49
B1	0.60, 1.45, 1.95, 2.22, 2.34, 2.47	Calcita, Dolomita	3.02, 2.88
S1	0.58, 0.92, 1.95, 2.22, 2.34, 2.45	Calcita	3.02
L1	0.48, 0.99, 1.98, 1.35, 1.44, 1.48, 1.54, 1.73, 2.21, 2.28, 2.45	Dolomita, Cuarzo	2.88, 4.2
Q1	0.60, 1.00, 1.98, 1.44, 1.48, 1.54, 1.73, 2.21, 2.28, 2.45	Cuarzo, Arcillas	4.26, 4.49
R1	0.49, 0.60, 0.63, 2.18, 2.27, 2.45	Calcita	3.02
D1	0.75, 1.00, 1.94, 2.25	Yeso	7.65
G1	0.45, 0.60, 0.63, 1.41, 1.73, 2.14, 2.32, 2.45	Piroxeno plagioclasa	4.03-4.04
P1	0.46, 0.99, 0.63, 1.93, 2.20, 2.31, 2.45	Piroxeno	2.52
P3	0.48, 0.63, 1.93, 2.02, 2.20, 2.31, 2.45	Calcita	3.02
A2	0.60, 0.63, 1.44, 1.73, 2.08, 2.28, 2.31, 2.45	Dolomita, Cuarzo	2.88, 4.26
P2	0.48, 0.63, 1.44, 1.73, 2.08, 2.28, 2.31, 2.45	Calcita, Dolomita	3.02, 2.88
		Cuarzo, Arcillas	4.26, 4.49

*Arcillas corresponden a kaolinita, illita, clorita, smectita.

DIFRACT-AT instalado en un IBM-AT conectado al difractoro, y con ayuda de una base de datos JCPDS.

A la mineralogía obtenida por difracción de rayos-X, se le han comparado los efectos de absorción teóricos de los diferentes minerales, según los distintos autores. Los datos quedan resumidos en la Tabla 2.

2.3. Medidas de campo de reflectividad y bandas del Thematic Mapper.

El principal objetivo de la radiometría de campo en este estudio es la caracterización de la reflectividad espectral de las diferentes litologías que aparecen en la zona, así como la selección y evaluación de índices de discriminación más útiles, para un posterior tratamiento digital de imágenes y clasificación.

Las medidas de reflectividad espectral de cada unidad litológica se han realizado sobre superficies discretas en la superficie del afloramiento que hemos considerado representativas de la totalidad de la unidad, en función de sus variaciones litológicas. Cada espectro final representa la media aritmética de tres medidas consecutivas, tomadas con un espectroradiómetro SIRIS (Single field of view spectroradiometer), en un rango de longitudes de onda de 0,4 a 2,5 µm.

Las interacciones que se producen entre los fotones y los átomos, moléculas y las redes cristalinas, y que permiten su diagnóstico en el rango espectral de 0,4-2,5 µm, son de dos tipos: electrónica y vibracional. La transición electrónica requiere niveles de alta ener-

gía, por lo que tiene lugar únicamente hasta longitudes de onda menores de 2 µm, frente a la vibracional que se manifiesta para mayores. La Tabla 3 resume los efectos de absorción en la región visible y en infrarrojo próximo.

Los elementos más comunes en la formación de rocas son O, Si y Al, junto con proporciones variables de Ca, Mg, Na, K y Fe, además de otros elementos menos abundantes (elementos traza). Los átomos de O, Si y Al tienen la capa electrónica con niveles de energía tal que la transición entre ellos, tiene un efecto pequeño o nulo en el rango del espectro visible o infrarrojo próximo (Goetz and Rowan, 1981; Goetz et al., 1983; Goetz, 1989). Los espectros de minerales y rocas están dominadas por el efecto de iones menos comunes y por la estructura molecular en la que se encuentran. Los elementos de transición con sus diferentes valencias, presentan un amplio rango de posibilidades, especialmente el Fe, por su abundancia, dando lugar a los efectos de absorción, bien conocidos en la zona visible del espectro (Rowan et al., 1977). Uno de los componentes que proporcionan más información sobre la especie mineral es precisamente su contenido en H₂O y OH⁻, y de la forma en la que esté formando parte, dentro o no, de la estructura cristalina.

Uno de los aspectos más interesantes de las medidas de reflectividad de campo es la evaluación de la respuesta espectral de las distintas unidades litológicas, como es el caso de este trabajo, en el espectro visible e infrarrojo próximo. La combinación del tratamiento digital de imágenes con las medidas espectrales de campo viene con el uso de los datos radiométricos como una guía para el posterior tratamiento de la imagen, así como para la construcción de varios indi-

Tabla 3.- Efectos de absorción en los minerales más comunes que aparecen en el rango espectral del visible e infrarrojo próximo.

Mineral	Efecto de Absorción(µm)	Referencia
Calcite	1.88, 2.00, 2.16, 2.35, 2.50	Hunt and Salisbury, 1971
Dolomita	1.86, 1.99, 2.14, 2.33, 2.53.	Hunt and Salisbury, 1971
Calcita	1.00, 1.45, 1.90, 2.30	Hunt et al., 1971a
Limonita	0.55, 0.90, 1.40, 1.90	Hunt et al., 1971a
Magnetita	Sin rasgo de absorción importante en el visible y infrarrojo, rasgo debil cerca de 1.00µm.	Hunt et al., 1971a
Yeso	1.43, 1.75, 2.20-2.27	Hunt et al., 1971b
Clorita	0.70, 0.90, 1.40, 1.90, 2.20	Hunt and Salisbury, 1970
Montmorillonita	0.50, 0.97, 1.40, 1.90, 2.2	Hunt and Salisbury, 1970
Kaolinita	0.50, 0.97, 1.4, 1.9, 2.2	Hunt and Salisbury, 1970
Piroxenos	0.77, 1.10, 1.40, 1.90, 2.2-2.5	Hunt et al., 1973a
Esmeclita	1.10, 1.41, 1.46, 1.91, 2.22	Lang et al., 1990
Cuarzo	Rasgo de absorción en el 2.3µm	Hunt and Salisbury, 1970

ces de clasificación. Este objetivo comienza con la aplicación de filtros al espectro, a fin de simular las bandas del Landsat-5 TM. La Figura 2 presenta la reflectividad de las diferentes unidades litológicas consideradas en el estudio.

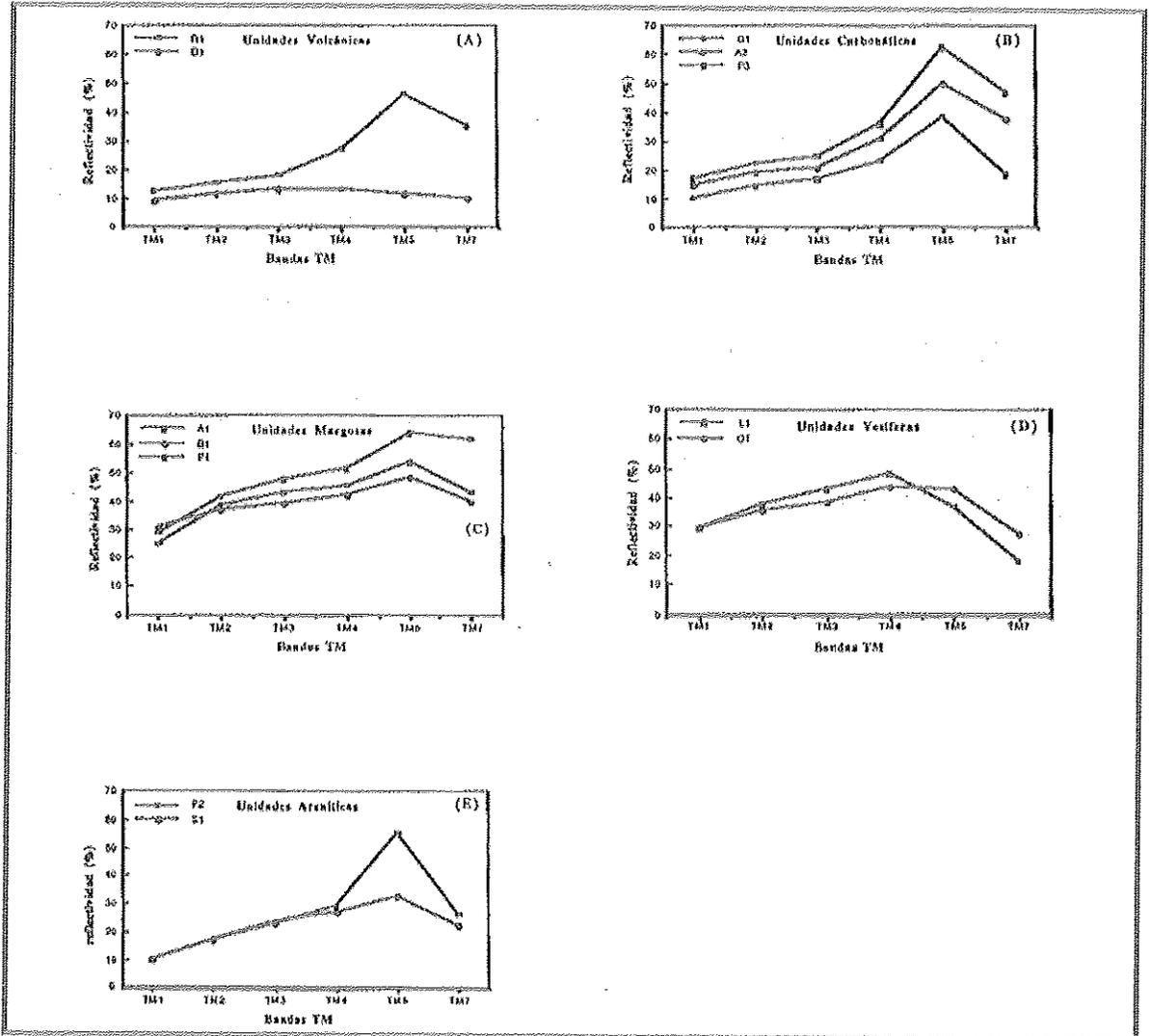


Figura 2.- Signatura espectral de las diferentes unidades litológicas consideradas en el estudio.

Región visible.

En la Figura 2, puede observarse que la reflectividad en la zona visible, TM1, TM2 y TM3, de las unidades G1, A2 y P3 se caracteriza por un suave incremento hacia mayores longitudes de onda de la zona visible, esto es, hacia TM3. Este aumento de la reflectividad hacia mayores longitudes de onda en la zona visible del espectro se explicó anteriormente. Los efectos de absorción que presentan los compuestos de hierro (incorporados en la estructura cristalina de las arcillas o fuera de ellas) no se observan de forma muy clara, dado que forman un pico de absorción débil y amplio.

El incremento de la reflectividad hacia la banda TM3 para las unidades yesíferas (L1 y Q1) es muy pronunciado a causa

de la naturaleza similar de sus espectros discutidos anteriormente.

En las muestras de yeso (L1 y Q1) se observa un incremento muy acusado de la reflectividad hacia la banda TM3, al igual que ocurre en el caso de las unidades margosas (A1, B1, P1), si excluimos a B1, que presenta un valor alto en la banda TM1 y donde el rasgo de absorción a 0,48 mm no aparece, al contrario que en las otras dos.

En las rocas volcánicas del cuerpo volcánico de Barqueros (R1, D1), las reflectividades de las lamproítas de tonos rojos y las oscuras presentan algunas diferencias. Para las del segundo tipo, los valores de reflectividad son constantes en la región visible del espectro, mientras que en las lamproítas rojas presentan un leve incremento hacia la banda TM3.

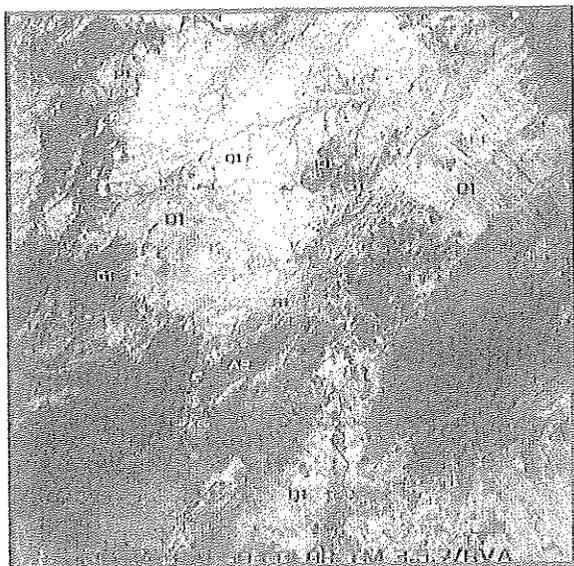


Imagen 1.- Véase Anexo de color.

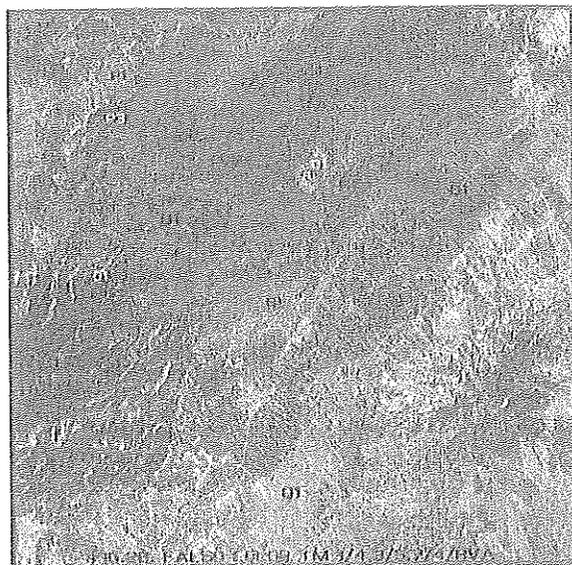


Imagen 2.- Véase Anexo de color.

Región del infrarrojo próximo.

En la zona del espectro del infrarrojo cercano, el comportamiento de la reflectividad espectral es diferente al observado en la del visible. En la mayoría de las unidades litológicas estudiadas, los valores de reflectividad alcanzan su máximo en la banda TM5, para disminuir con longitudes de onda más largas (banda TM7). Esta característica se cumple, a excepción de los basaltos oscuros del cuerpo volcánico de Barqueros (B1), en cuyo caso se mantiene una reflectividad más o menos constante en todo el espectro.

En las unidades carbonáticas (G1, A2, P3) la reflectividad sigue el mismo modelo general, con un máximo en la banda TM5 para tener un neto descenso en la banda TM7. La ausencia de un importante rasgo de absorción en el rango de 1,55-1,75 μm (TM5) se debe al equilibrio entre los procesos electrónico y vibracional (Hunt, 1977).

Las unidades margosas de A1, B1 y P1, presentan la misma tendencia de reflectividad en las bandas TM4, TM5 y TM7. La diferencia relativa de TM7 de las diferentes unidades margosas es debido al distinto contenido en arcillas y carbonatos, que tienen sus efectos de absorción más importantes en esta banda. La reflectividad más baja de A1 en la banda TM4, se debe a la presencia de la absorción de 0.9 μm , localizada dentro de esta banda.

Los espectros de las unidades de yeso, L1 y Q1, presentan un cierto paralelismo hasta la banda TM4, pero en las bandas TM5 y TM7 la disminución de la reflectividad en A1 es mucho más acusada, con una mayor absorción en 1,73, 2,20, 2,28 μm . Ello tiene su justificación en la propia composición de ambas litologías, de tal forma que L1 es un yeso bastante puro, mientras que Q1 es de una litología algo más compleja, con mayores proporciones de arcillas (ver Tabla 2).

2.4. Discriminación de las unidades litológicas a partir de la radiometría de campo.

La reflectividad espectral de cada roca (o unidad litológica), es función de su composición mineralógica (Hunt and Salisbury, 1970; Hunt y Salisbury, 1971; Hunt et al., 1971a; Hunt y Salisbury, 1970; Hunt et al., 1971b). A partir de las muestras consideradas, se pueden diferenciar cinco clases diferenciables radiométricamente.

1. Basaltos oscuros (D1), que presentan constancia en todo el rango del visible e infrarrojo próximo del espectro (Figura 2, A).

2. Unidades carbonáticas de Pliego, Alhama 1 y Gévar (P3, A2, G1), incluyendo además las lamproitas rojas del cuerpo volcánico de Barqueros. Este grupo se define por una reflectividad baja en la región del visible y alta en el infrarrojo cercano, especialmente en el rango coincidente con TM5.

3. El grupo de margas (A1, B1, P1), con una acusada pendiente positiva en la región del visible, y un máximo en TM5. Esta tendencia presenta ciertas variaciones para los distintos casos, condicionada por sus composiciones mineralógicas (Figura 2, C).

4. El grupo del yeso incluyendo los de la Formación Yesos de Librilla (L1) y los materiales cuaternarios yesíferos (A1). Este grupo presenta unas absorciones relativas mucho más fuertes en las bandas TM5 y TM7 con respecto a los observados en los demás ejemplos (Figura 2, D).

5. Grupo de sedimentos rojos (S1, P2), en los que se aprecia un aumento de la reflectividad más o menos constante al hacerlo la longitud de onda, con un ligero descenso en la banda TM7. Este fenómeno es algo más acusado en S1 (Figura 2, E).

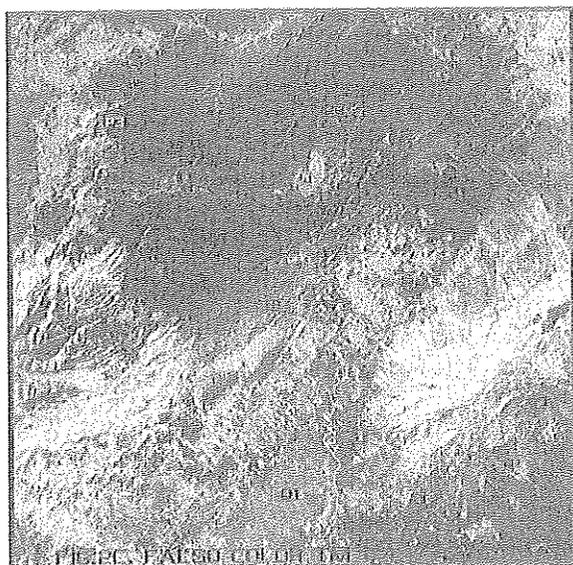


Imagen 3.- Véase Anexo de color.

Estas agrupaciones pueden tener un sentido más concreto, como puede ser el caso de la erosionabilidad de las unidades. Así por ejemplo, el contenido en filosilicatos pueden ser traducidos en bandas TM, y pueden ser discriminados a partir de ellas. De esta forma, la menor reflectividad de la Formación margas de Fortuna (B1), que presentan morfologías en badlands, en TM1 y TM7, en comparación con las margas del Oligoceno-Mioceno inferior (P1) y con A1, indica la naturaleza más friable de la primera debido a su contenido en arcillas y yeso.

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES

Para el estudio de análisis e interpretación de imágenes, se ha usado una ventana de la escena 199-34 de la fecha 14-9-1987. Se han construido diversos falsos colores con las bandas y con divisiones de bandas del TM, con el fin de realizar discriminaciones litológicas. Los falsos colores se han construido a partir de los datos radiométricos obtenidos en el campo. La validez de los distintos tratamientos se ha contrastado mediante mapas geológicos de base (IGME, 1976) y fotointerpretación aérea de algunas zonas. Previamente a la construcción de los falsos colores, cada banda o división de bandas ha sido sometida a una equalización de histograma y a un "stretching".

Interpretación de las imágenes

Se han realizado diversos intentos para reconocer y discriminar las diferentes unidades litológicas por teledetección. Diversos tipos de tratamiento digital se han aplicado a las imágenes Landsat al objeto de conseguir el máximo contraste.

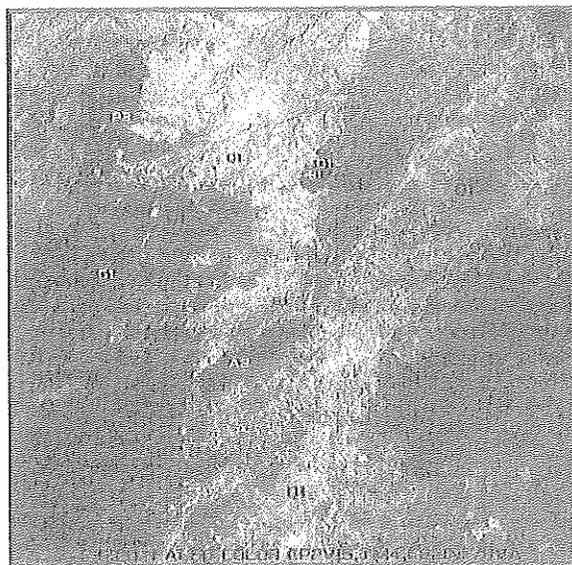


Imagen 4.- Véase Anexo de color.

La selección de las bandas óptimas para realizar los falsos colores se llevó a cabo utilizando: (i) información relativa a los rasgos de absorción de los distintos materiales, que fue obtenida por radiometría de campo, y (ii) análisis estadístico entre bandas.

Composiciones de falso color

Las combinaciones en falso color de las bandas del TM 3, 5, 7; 1, 5, 7 y 2, 5, 7 como RVA proporcionan información útil para reconocer y discriminar las unidades: L1 (yeso), que aparece muy contrastada; S1 (conglomerados rojos continentales); B1 (margas yesíferas); P1 (calizas nummulíticas) y P2 (margas), con contrastes más suaves. Otros falsos colores, comprobados por interpretación visual, son 1, 4, 5; 2, 4, 7; 3, 4, 7 y 2, 4, 5 como RVA. Estas composiciones son útiles para diferenciar las cubiertas L1, B1, Q1 (varios tipos de depósitos cuaternarios) y D1 (lamproitas oscuras), mostrando menos contraste para las unidades P1 y P2 (Imágenes 1 y 2).

Combinaciones entre cocientes de bandas

Estas combinaciones han añadido información adicional para reconocer las unidades de desertificación. Las combinaciones más útiles son las que realzan las diferencias en la respuesta espectral debidas a los diferentes rasgos de absorción asociados a la composición mineralógica de cada una de las unidades litológicas estudiadas. Las combinaciones: 1/4, 3/5, 7/4; 1/4, 1/7, 3/5; 1/4, 1/5, 3/5; 3/5, 4/3, 7/4; 3/2, 3/5, 5/7 y 1/4, 1/5, 3/2 como RVA, proporcionan contrastes tonales que permiten discriminar las unidades Q1, L1, B1, P1 y P2 y reconocer los distintos tipos de cobertura

vegetal. En concreto, estas combinaciones de bandas expresadas en forma de falso color permiten realzar el contraste tonal de la unidad S1, que aparece mucho más diferenciada que en las combinaciones de bandas TM originales (Imagen 3).

Análisis de Componentes Principales

Otra técnica de tratamiento de imágenes que se han aplicado para el reconocimiento y discriminación de las unidades litológicas es el Análisis de Componentes Principales (ACP), utilizado para comprimir la información contenida en todas las bandas originales del TM (reducción de la dimensión). El falso color obtenido a partir de las tres primeras componentes como RVA muestra una imagen altamente contrastada, muy útil para la discriminación de las unidades G1, L1, S1, D1, B1, Q1, P1 y P2. Visualmente se ha comprobado que con esta técnica se logra la separabilidad de la unidad S1, que no se conseguía con los tratamientos anteriores (combinaciones de bandas y de cocientes).

El Análisis de Componentes Principales se ha aplicado también a conjuntos de cocientes de bandas. Así, cuando se aplica a 4/3, 5/7, 3/2 y 7/4 y se realiza el falso color habitual a las tres primeras componentes, se encuentran muy realzadas las unidades con alto contenido en hierro y las que presentan alta concentración en calcita y yeso (L1, Q1, G1). En general este tratamiento mejora el contraste tonal para la identificación de las unidades G1, L1, D1, R1, S1 y Q1.

Por otra parte, cuando se realiza un falso color tomando como RVA la segunda componente de las tres bandas visibles (TM1, TM2, TM3), la banda TM4 y la segunda componente de las bandas del infrarrojo medio (TM5, TM7), respectivamente, se obtiene también una composición con contrastes muy acentuados entre las distintas unidades litológicas estudiadas y de interpretación muy clara (Imagen 4).

Con respecto a la aplicación de la teledetección al reconocimiento y discriminación de las unidades litológicas, podemos concluir diciendo que:

(I) Las distintas composiciones en falso color construidas permiten una buena discriminación de las unidades L1, B1, S1, A2, Q1, P1 y P2.

(II) La identificación de las unidades P3, A1 y G1 es más conflictiva. No obstante, las unidades carbonáticas se pueden cartografiar como una unidad en la imagen dado que se presentan una concentración de material orgánico que permite el crecimiento de vegetación densa, principalmente formada por bosques de pinos, fácilmente identificables en las imágenes.

4. CONCLUSIONES

Las imágenes del Thematic Mapper se han empleado, en el presente trabajo, para la cartografía geológica y discriminación de distintas unidades litológicas. La radiometría de campo ha sido útil para el estudio del comportamiento espectral de las distintas unidades consideradas y para la construcción y selección de relaciones de bandas. Las combinaciones de

los falsos colores de 752, 754, 753 y 135 como RVA aportan especial información para la cartografía y discriminación. Las relaciones de bandas y componentes principales de todas las bandas TM como RVA, ha resultado ser una buena herramienta de delineación de ciertas unidades litológicas. En el caso concreto de los afloramientos de yeso, un falso color que emplee las bandas TM5 y TM7 ha resultado ser muy conveniente, de tal suerte que ha permitido extender los afloramientos a áreas más extensas que las representadas en el mapa geológico de base.

5. BIBLIOGRAFIA

- ✓ AZEMA, J.O.; FOUCAULT, A.; FOURCADE, E.; GARCIA-HERNANDEZ, M; GONZALEZ-DONOSO, J.M.; LINARES, A; LINARES, D; LOPEZ GARRIDO, A.C.; RIVAS, P. y VERA, J.A. (1979): *Las microfacies del Jurásico y Cretácico de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas*. Secr. Publ. Univ. Granada, 83 p.
- ✓ GOETZ, A.F.H. (1989): Spectral remote sensing in geology. In: Asrar, G. (1989). *Theory and application of remote sensing*. John Wiley & Sons, New York, pp. 491-525.
- ✓ GOETZ, A.F.; ROCK, B.N. and ROWAN, L.C. (1983): Remote sensing for exploration. *Economic Geology*. Vol. 78, pp. 573-590.
- ✓ GOETZ, A.F.H. and ROWAN, L.C. (1981): Geologic remote sensing. *Science*. Vol. 211, pp. 781-791.
- ✓ ROWAN, L.C.; GOETZ, A.F.H. and ASHELY, R.P. (1977): Discrimination of altered and unaltered rocks in the visible and near infrared multispectral images. *Geophysics*. vOL. 42, n°3, PP. 522-535.
- ✓ HUNT, G.R. and SALISBURY, J.W. (1970): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals. *Modern Geology*. Vol. 1, pp. 283-300.
- ✓ HUNT, G.R. and SALISBURY, J.W. (1971): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Carbonate minerals. *Modern Geology*. Vol. 2, pp. 23-30.
- ✓ HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. and LENHOFF, C.J. (1971a): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and Hydroxides. *Modern Geology*. Vol. 2, pp. 195-205.
- ✓ HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. and LENHOFF, C.J. (1971b): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulphide and Sulphates. *Modern Geology*. Vol. 3, pp. 1-14.
- ✓ HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. and LENHOFF, C.J. (1973a): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Additional Silicates. *Modern Geology*. Vol. 4, pp. 85-106.
- ✓ IGME (1976): Mapa geológico de España E: 1/50.000, Hoja n°912 (Mula). Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- ✓ IGME (1976): Mapa geológico de España E: 1/50.000, Hoja n°933 (Alcantarilla). Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- ✓ KAMPSCHUUR, W. (1972): *Geology of the Sierra de Carrascoy SE Spain with emphasis on alpine polyphase deformation*. Thesis Amsterdam.
- ✓ MONTENAT, C. (1977): Les bassins sédimentaires du Levant d'Alicante et de Murcia. Stratigraphie, paléogéographie et évolution dynamique. *Doc. Lab. Fac. Sci. Lyon*, 69, 345 p.
- ✓ OTT D'ESTEVOU, P. & MONTENAT, C. (1985): Evolution structurale de la zone bétique orientales (Espagne) du Tortonien à l'Holocène. *C.R. Acad. Sci. (Paris)*, (D) 300, 363-368.

