

Evaluación preliminar de una imagen Landsat TM para la cartografía de rocas volcánicas (Cabo de Gata, Almería)

A. RIAZA

RESUMEN

Las diferencias mineralógicas entre rocas volcánicas, así como en aquellas rocas afectadas por alteración hidrotermal, han servido de base para una cartografía de las mismas sobre imágenes Thematic Mapper.

La presencia de piroxenos o anfíboles en andesitas, y la neoformación de minerales como alunita, pirofilita, caolinita, illita y clorita a distancias progresivamente más alejadas del foco de mayor intensidad de alteración hidrotermal, influye en el comportamiento espectral de las rocas que los contienen.

Se han examinado composiciones en falso color con las bandas 3, 2 y 1 simulando color natural, al igual que con las bandas 1, 4 y 7, y 2, 4 y 5, seleccionadas por criterios de correlación para definir conjuntos litológicos susceptibles de ser estudiados espectralmente.

Partiendo de una composición en color de cocientes de bandas en que estaban representados el cociente 5/7 en rojo, el 3/1 en verde y el 4/3 en azul, asociados respectivamente a minerales arcillosos, óxidos de hierro y vegetación, se construyeron otras combinaciones con el objeto de evaluar sus resultados

cartográficos. El cociente 5/4 fue comparado con el 3/1 en relación con minerales ferruginosos. El cociente 5/7 ofrece ambigüedades en su interpretación por interferencia de efectos de vegetación. El cálculo de componentes principales sobre los cocientes 5/7 y 4/3 proporcionó una imagen mejor relacionada con el contenido en arcillas por medio de la segunda componente principal. Todos los cocientes han sido sometidos a segmentación de intervalos de valores de números digitales para una mejor interpretación en términos litológicos.

De este modo, andesitas piroxénicas y anfibólicas son diferenciables entre sí, así como distintas zonas con distinta intensidad de alteración hidrotermal en los dos focos principales que aparecen en el área de estudio. También es posible cartografiar un conjunto indiferenciado de dacitas y andesitas anfibólicas.

ABSTRACT

Mineralogical differences among volcanic rocks as well as hydrothermally altered rocks, have been used for mapping using Thematic Mapper images.

The occurrence of pyroxenes or amphiboles in andesites, and the

presence of alunite, pyrophyllite, kaolinite, illite and chlorite at progressively greater distances from the highest hydrothermal alteration point influence the spectral behaviour of the rocks in which they are present.

A false color combination with bands 3,2 and 1 in red, green, and blue respectively, simulating natural colour has been examined in order to appreciate vegetation distribution and geomorphological features. Combination with bands 1,4 and 7, and 2,4 and 5 selected under correlation analysis helped defining lithological units suitable for spectral study.

A colour ratio composite with ratio 5/7 in red, 3/1 in green and 4/3 in blue, associated to clay minerals content, iron content and vegetation, respectively, was used as a basis for mapping. Ratio 5/4 was tested for iron-bearing minerals content. Ratios 5/7 and 4/3 offer redundant values in relation to vegetation. Alleviation to this problem was attempted by calculating principal components for both of them, using the second principal component thus obtained as representative of abundance of clay minerals. All ratios have been subjected to intensity slicing (density slicing) for a better understanding in terms of lithologies.

Pyroxenic andesites and amphibolitic andesites can be distinguished. The areas with most intense hydrothermal alteration are distinctly shown in images, as well as a unit consisting of amphibolitic dacites and andesites.

INTRODUCCION

La aplicación de imágenes a la cartografía litológica se ha visto enriquecida con la aparición de los satélites Landsat, provisto de una

banda centrada en 2.2 μ m. Ciertos minerales arcillosos ligados a procesos de alteración hidrotermal presentan picos de absorción diagnósticos en este intervalo de longitudes de onda.

El área de estudio seleccionada ofrece condiciones favorables por la escasez de vegetación y la presencia de unidades volcánicas afectadas intensamente por procesos de alteración hidrotermal. La transformación de los feldspatos en minerales arcillosos, y de los sulfuros de hierro en un conjunto de óxidos e hidróxidos de hierro conocido como limonita, son procesos que tienen lugar durante la alteración.

Las rocas volcánicas alteradas en el área de estudio contienen alunite, pirofilita, caolinita, illita-esmectita y clorita en distintas proporciones en función de la intensidad de la alteración (LODDER, 1966). Estos minerales no están presentes en las rocas no afectadas por la alteración hidrotermal. Las curvas espectrales de los minerales mencionados presentan picos de absorción característicos centrados en la banda 7 del TM (HUNT y ASHLEY, 1979).

Las rocas volcánicas no alteradas ofrecen diferencias mineralógicas basadas en el contenido en cuarzo, y la presencia o ausencia, o abundancia relativa de distintas variedades de piroxenos y anfíboles entre los fenocristales. Estos minerales registran picos de absorción centrados en 2.3 μ m en sus curvas espectrales. (HUNT, ASHLEY y LENHOFF, 1973)

El recubrimiento vegetal heterogéneo dificulta la interpretación de las imágenes en términos litológicos. La respuesta espectral de distintas rocas se ve afectada de diferente manera por la presencia de un recubrimiento vegetal uniforme

(SIEGAL y GOETZ, 1977). Por ello, se han incluido combinaciones que expresen la influencia de la vegetación en el área de estudio.

El uso de cocientes de bandas es habitual en la discriminación litológica (PODWYSOCKI, SEGAL y ABRAMS, 1983; ROWAN y KAHLE, 1982; ROWAN et al., 1984). El ensayo y comparación de algunas combinaciones (ROWAN et al., 1987) de significado espectral conocido constituye la base fundamental del tratamiento digital utilizado.

MARCO GEOLOGICO

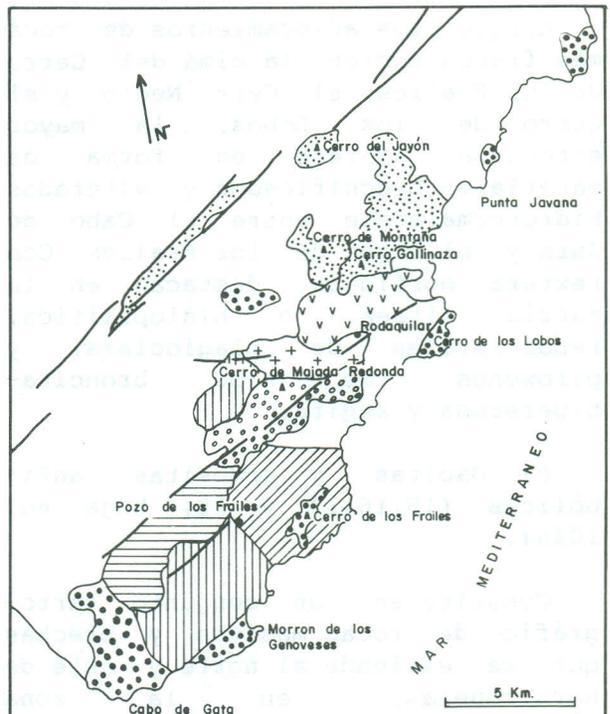
El sureste de la Península Ibérica ha sido escenario de un volcanismo complejo a lo largo de todo el Neógeno, producido durante una fase distensiva de los movimientos en dos etapas, de las que los materiales del Cabo de Gata representan la más antigua. Los materiales volcánicos se distribuyen en dirección NE-SO, a lo largo de fracturas, cuyo ejemplo más significativo es el accidente de Carboneras, que han controlado asimismo la apertura de cuencas sedimentarias rellenas por materiales sedimentarios postorogénicos de edad Messiniense y Plioceno, en su mayor parte de composición carbonatada.

Las rocas eruptivas del Cabo de Gata corresponden a un volcanismo calco-alcalino, constituidas por andesitas-basálticas, andesitas, dacitas y riolitas, cristalizadas en condiciones casi anhidras (LOPEZ RUIZ y RODRIGUEZ BADIOLA, 1980).

La diferenciación magmática da lugar a una gran variedad petrográfica de rocas en las que existen muchos tipos intermedios, cuya cartografía se ha basado tanto en la posición estratigráfica como en la composición mineralógica.

Tomando como referencia la

cartografía del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (PINEDA VELASCO et al., 1983, hojas 1046 y 1060), y comparando con las imágenes utilizadas en este estudio (fig. 1), se han agrupado las unidades litológicas en cuatro conjuntos, a los que nos referiremos en lo sucesivo (fig.1):



LEYENDA

-  Dacitas y Andesitas Anfibólicas
-  Dacitas Biotítico-Anfibólicas no alteradas
Mod. Alteradas
Muy Alteradas
-  Andesitas Anfibólicas
-  Andesitas Piroxénicas no alteradas
Moderadamente Alteradas
Muy Alteradas

Fig. 1: Mapa geológico de la región del Cabo de Gata (Almería) basado en imágenes TM.

a) Andesitas anfibólicas (1, 2 y 3, hoja no. 1060).

Bien representadas en el Cerro de los Frailes, presentan una textura porfídica constituida por una matriz hipocristalina o vítrea, y fenocristales de plagioclasa, anfíboles y piroxenos en menor cantidad. El anfíbol es de tipo hornblenda.

b) Andesitas piroxénicas (13 y 14, hoja no. 1046).

Aunque los afloramientos de roca más fresca cubren la cima del Cerro de los Frailes, el Cerro Negro y el Cerro de los Lobos, la mayor extensión aparece en forma de materiales brechificados y alterados hidrotermalmente entre el Cabo de Gata y el Pozo de los Frailes. Con textura porfídica, destacan en la matriz vítrea o hialopilitica, fenocristales de plagioclasa, y piroxenos de tipo broncita-hiperstena y augita.

c) Dacitas y andesitas anfibólicas (15,16,17 y 18, hoja no. 1046).

Constituyen un conjunto cartográfico de rocas masivas y brechas que se extiende al norte y este de Hortichuelas, en la zona septentrional, cubriendo los Cerros Gallinaza, Montaña, Tórtola y Jayón, además de una orla de brechas que al noroeste se extiende desde el alto del Castillico al Llano de San Antonio.

d) Dacitas biotítico-anfibólicas rojo-violáceas (20 y 21, hoja 1046)

Afloran extensamente en la parte central, y constituyen el encajante del yacimiento de Rodalquilar. Tiene su expresión como roca no alterada en el cerro de Majada Redonda al sur del mismo. Ofrecen un aspecto masivo de color rojizo, con grandes fenocristales de cuarzo y plagioclasa.

Existen dos focos principales de alteración hidrotermal. El primero de ellos tiene su núcleo en el Cerro

de Cinto, y sirve de enclave al yacimiento de oro de Rodalquilar. El segundo enmarca más al sur el distrito de la plata de Santa Bárbara, en las proximidades del Pozo de los Frailes, donde se han explotado minas de plata, plomo y manganeso.

Las características mineralógicas de los procesos de alteración son similares en ambos casos, habiendo sido descritas por LODDER (1966) para el distrito de Rodalquilar. A distancias progresivamente más alejadas del foco de calor se desarrollan crecimientos de minerales en una secuencia constante. En las zonas más alejadas aparece clorita, más adelante se neoforman illita y esmectita, y en las zonas de alteración más intensa, se observa alunita, pirofilita y caolinita, además de una fuerte silicificación y enriquecimiento en óxidos de hierro y otros compuestos, como por ejemplo, jarosita.

CARACTERISTICAS ESPECTRALES DE ROCAS Y MINERALES PRESENTES

Los tipos petrográficos de rocas volcánicas en las que se concentra este estudio, tienen una composición mineralógica similar, diferenciable sólo por los porcentajes relativos de algunos componentes, y por la presencia de minerales accesorios.

Dacitas y andesitas se distinguen de modo general por su contenido en cuarzo, siendo las dacitas el término más ácido. Las dacitas en el área de estudio presentan la particularidad de poseer fenocristales de biotita y anfíbol de tipo hornblenda, además de cuarzo y plagioclasas. Las andesitas se diferencian en dos tipos, según que contengan como accesorios piroxenos y anfíboles.

Piroxenos y anfíboles son silicatos químicamente similares, con la excepción de que los

anfíboles contienen grupos OH en su estructura cristalina. El piroxeno más común, y el que se presenta en las rocas del Cabo de Gata, es la augita. Su curva espectral muestra débiles mínimos sobre 0.77 μm debidos a la presencia de ión ferroso, y sobre 1.1 μm por el ión férrico (fig. 2). La variedad hiperstena de piroxeno, enriquecida en hierro, ofrece una intensificación de estos picos de absorción causados por los procesos electrónicos de los iones, más abundantes en este caso, de hierro. (HUNT y SALISBURY, 1970).

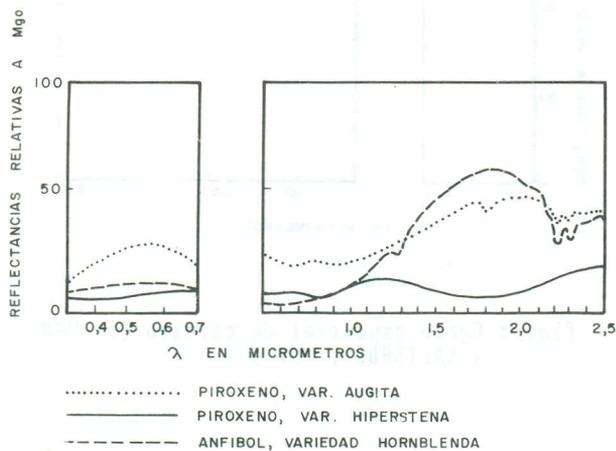


Fig. 2: Curvas espectrales de piroxenos de variedades augita y hiperstena, y anfíbol de variedad hornblenda (in HUNT y SALISBURY, 1970).

Los mismos mínimos aparecen en la curva del anfíbol de variedad hornblenda (fig. 2). Sin embargo, son aquí más acusados los picos de absorción en 1.4 μm y 2.4 μm producidos por los procesos vibratorios de los grupos OH (HUNT y SALISBURY, 1970).

Dacitas y andesitas son rocas cuyas propiedades espectrales están oscurecidas por su contenido en minerales opacos, que al ser espectralmente planos, desdibujan las irregularidades producidas por los otros componentes. Aún así, las rocas con textura porfídica son espectralmente más expresivas, y esta tendencia se acentúa cuanto mayor sea la alteración que presenten sus componentes minerales.

Las curvas correspondientes a dacitas muestran un descenso hacia el azul a partir de 0.55 μm y un mínimo débil sobre 1.0 μm atribuible al ión ferroso (fig. 3). Los tres mínimos, igualmente débiles en 1.4 μm , 1.9 μm y 2.4 μm se deben a la presencia de hornblenda (HUNT, SALISBURY y LENHOFF, 1973).

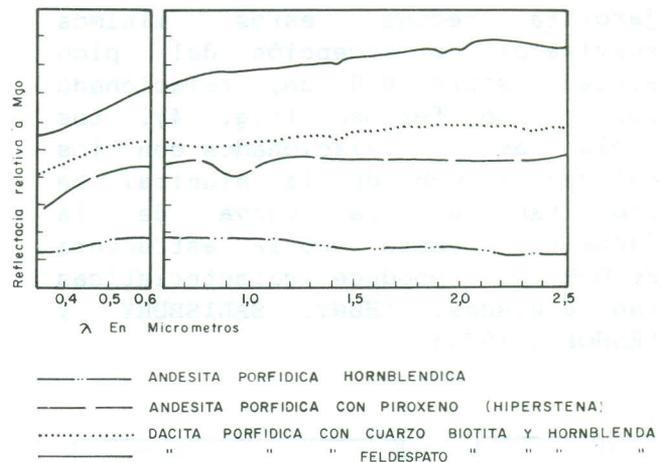


Fig. 3: Curvas espectrales de andesitas y dacitas porfídicas con distintos minerales entre los fenocristales (in HUNT, SALISBURY y LENHOFF, 1973 y 1974).

Las andesitas con fenocristales de hiperstena producen curvas que tienen como rasgo llamativo un amplio mínimo en 0.9 μm , debido al contenido en hierro de la hiperstena (fig. 3). El resto del trazado es más o menos uniforme, por efecto de los opacos (HUNT, SALISBURY y LENHOFF, 1974).

Los procesos de alteración hidrotermal producidos por la acción de soluciones ácidas sulfuradas derivadas de gases volcánicos, dan lugar a una serie de transformaciones minerales. Las plagioclasas se convierten fundamentalmente en alunita, mientras que piroxenos y anfíboles dan lugar a un conjunto de filosilicatos y carbonatos. De igual modo, los sulfuros de hierro se oxidan e hidratan produciendo un conjunto de óxidos e hidróxidos conocido como limonita.

La alunita es un sulfato

hidratado de aluminio, que en el caso de que el reemplazamiento de aluminio por hierro sea fuerte se conoce como jarosita. Todos los acusados picos de absorción de la curva espectral de la alunita se deben a combinaciones de tonos y sobretonos de los grupos OH, centrados sobre todo en 1.4 μm , 1.8 μm , 2.2 μm , y 2.5 μm . La curva de la jarosita recoge estos mínimos suavizados, a excepción del pico situado sobre 0.9 μm , relacionado con el ión ferroso (fig. 4). Los demás rasgos, relacionados con los enlaces Al-O-H de la alunita, se debilitan en la curva de la jarosita, puesto que la estructura Fe-O-H no produce características tan acusadas. (HUNT, SALISBURY y LENHOFF, 1971).

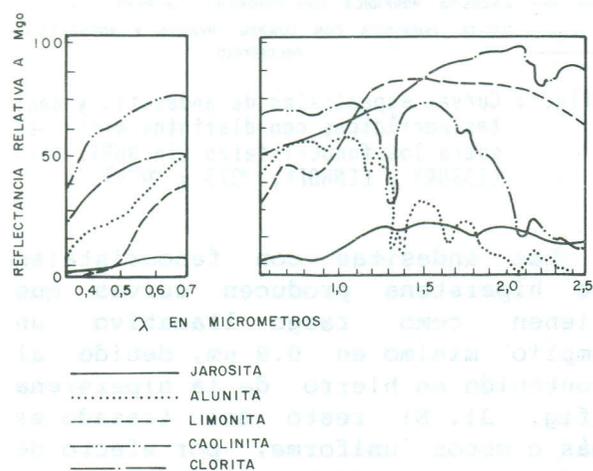


Fig. 4: Curvas espectrales de distintos minerales asociados a procesos de alteración hidrotermal (in HUNT, SALISBURY y LENHOFF, 1970 y 1971)

Clorita, caolinita, pirofilita, illita y esmectita son filosilicatos, comunmente procedentes de la alteración de piroxenos y anfíboles, cuya estructura cristalina muestra una disposición en capas ligadas entre sí por grupos OH (fig. 4). Todos ellos tienen como rasgo común la presencia de acusados picos de absorción centrados en 2.2 μm . (HUNT y SALISBURY, 1970).

Los carbonatos, compuestos que

también reemplazan de modo común a los piroxenos y anfíboles durante los procesos de alteración, presentan curvas espectrales caracterizadas por una serie escalonada de mínimos entre 1.8 μm y 2.5 μm (fig. 5). Los más acusados se sitúan por lo general sobre 2.4 μm y 2.5 μm , y se deben a efectos vibratorios del anión carbonato. (HUNT y SALISBURY, 1971).

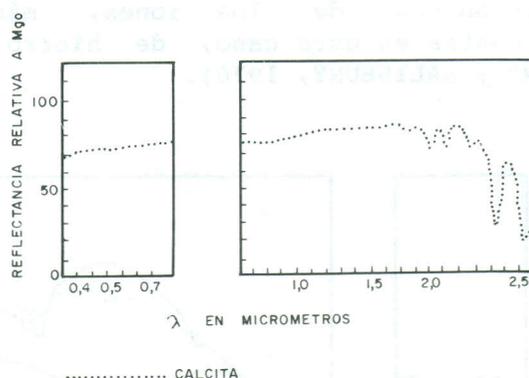


Fig. 5: Curva espectral de calcita (in HUNT y SALISBURY, 1971)

La curva espectral de la limonita, término que abarca un conjunto de cantidades variables de óxidos e hidróxidos de hierro, despliega un mínimo acusado en 0.9 μm (fig. 4), típico de los óxidos férricos, y otros sobre 1.4 μm y 1.9 μm , que delatan efectos de hidratación. (HUNT, SALISBURY y LENHOFF, 1971).

De todo ello se deduce, que tanto los piroxenos y anfíboles, contenidos como fenocristales en dacitas y andesitas, como los minerales arcillosos y óxidos de hierro producidos por procesos de alteración hidrotermal sobre estas rocas, poseen rasgos espectrales distintivos. Esto les hace susceptibles de ser discriminados en imágenes registradas en intervalos de longitudes de onda coincidentes con sus rasgos diagnósticos, cuales son las imágenes Thematic Mapper.

INTERPRETACION DE LAS IMAGENES

1. Imágenes en falso color

Las bandas 3, 2 y 1 del Thematic Mapper cubren aproximadamente los intervalos de longitudes de onda del rojo, verde y azul en el visible. Por ello se ha realizado una composición en falso color para simular el color natural y efectuar apreciaciones de recubrimiento vegetal y rasgos geomorfológicos.

La región del Cabo de Gata consiste en una cadena costera montañosa de baja altura sometida a un clima subdesértico. El recubrimiento vegetal es poco denso, pero bastante extendido en forma de matorral bajo de esparto y palmitos más o menos apretado, denominado localmente "espartal". El espartal aumenta de densidad en las zonas más elevadas, coincidiendo con afloramientos de andesitas piroxénicas y dacitas biotítico-anfibólicas. La región de mayor densidad de recubrimiento vegetal es el Cerro de Majada Redonda, que representa la mayor altitud del área, y conserva la forma de caldera volcánica con una amplia depresión central. Las sombras por efectos topográficos son muy acusadas en las crestas al norte y suroeste del Cerro de Majada Redonda, así como en el área al suroeste del Pozo de los Frailes.

En la imagen en falso color 3, 2, 1 se observan tonos rojizos en la depresión al oeste de la Sierra de Gata, que corresponden a suelos lateríticos rojos conocidos como "tierra colorá".

Seleccionando las bandas con menor coeficiente de correlación se han confeccionado dos imágenes en falso color con las bandas 1, 4, 7 y 2, 4 y 5, en rojo, verde y azul respectivamente, para hacer una aproximación a la variabilidad espectral de los materiales que afloran en el área. Ambas imágenes

muestran un aspecto espectral similar para las andesitas piroxénicas y las dacitas biotítico-anfibólicas. Las andesitas anfibólicas del Cerro de los Frailes parecen comportarse espectralmente como las dacitas y andesitas anfibólicas del Cerro Gallinaza y adyacentes.

2. Composiciones de cocientes de bandas

El análisis de cocientes de bandas es un método que ha sido utilizado reiteradamente para detectar diferencias espectrales entre bandas. Se utilizan especialmente cuando el numerador representa valores espectralmente constantes para el objeto escogido, mientras que el denominador está sujeto a variaciones respecto a las características espectrales del material objeto de estudio. Los cocientes eliminan las variaciones globales de reflectancia, y ponen de manifiesto aquellas variaciones que obedecen a causas locales. De este modo, los efectos topográficos se reducen considerablemente, y se favorece la detección de áreas cubiertas, en este caso, por litologías espectralmente diferentes.

El cociente entre las bandas 4 y 3 del Thematic Mapper se usa como índice del recubrimiento vegetal, debido a la alta reflectancia que la curva de la vegetación experimenta en el intervalo de longitudes de onda cubierto por la banda 4 respecto a su equivalente en la 3 (ELVIDGE y LYON, 1985).

La relación 5/7 se utiliza como un detector de minerales arcillosos, tomando como referencia los fuertes picos de absorción de los mismos en la banda 7 (ROWAN et al, 1974; PODWYSOCKI et al, 1983; ROWAN et al, 1987). De igual modo, y a causa de la absorción de hierro sobre 0.55 μm , se toma como representativa del contenido en hierro el cociente

3/1.

La composición de color en que se asigna el color rojo al cociente 5/7, verde al 3/1 y azul al 4/3, muestra una distribución de colores interpretable según estas premisas. Las andesitas piroxénicas del Pozo de los Frailes muestran colores azul turquesa, y magenta en las laderas más sombrías, donde el crecimiento de la vegetación es más denso. En tonos verdes con intercalación de un punteado anaranjado se presentan tanto las andesitas anfibólicas del Cerro de los Frailes como las dacitas y andesitas anfibólicas del Cerro Gallinaza. Las dacitas biotítico-anfibólicas rojo violáceas del Cerro de Majada Redonda muestran colores azul turquesa y magenta en las pendientes orientadas al oeste, al igual que las andesitas piroxénicas del Pozo de los Frailes. Las regiones con alteración hidrotermal más intensa aparecen con tonos amarillos y anaranjados, signo de su abundancia tanto en arcillas como en óxidos de hierro, y a estar desprovistas de vegetación, en gran parte a causa de la abundancia de labores mineras.

Sobre cada uno de los cocientes de bandas mencionados se ha realizado una segmentación de intervalos de valores de números digitales con el objeto de delimitar con mayor precisión las áreas detectadas con mayor contenido en unos materiales u otros.

En el cociente 5/7, las áreas donde los números digitales son más altos coinciden con el Cerro del Cinto y el Cerro de los Tollos en las proximidades de Rodalquilar, y con las zonas más alteradas al suroeste del Pozo de los Frailes. Esto concuerda con su presunto registro en abundancia de minerales arcillosos, ligados a las zonas alteradas hidrotermalmente.

Sin embargo, también se dibujan las laderas semicirculares del Cerro

de Majada Redonda, y la cima del Cerro de los Frailes, ocupada por andesitas piroxénicas no alteradas. Probablemente la mayor abundancia de vegetación en estos dos casos interfiere, puesto que la relación 5/7 es igualmente alta en la curva espectral de la vegetación.

El cociente 3/1, representativo de la distribución de minerales de hierro, muestra poca relación con las zonas de alteración hidrotermal. Sí, en cambio, están reflejados los suelos lateríticos que cubren la depresión occidental, tan bien señalados con tonos rojizos en la simulación de color natural.

Un nuevo cociente haciendo intervenir la alta reflectancia de los materiales ferruginosos en la banda 5, y tomando en cuenta los picos de absorción situados sobre 0.9 μm , incluidos en la banda 4, fue sometido a segmentación de intervalos de valores de números digitales. El cociente 5/4 presenta una distribución de valores altos que se ajusta a las regiones donde existe una alteración hidrotermal más intensa (foto 1) con un enriquecimiento en sílice y óxidos de hierro, además de alunita.

Sustituyendo el cociente 3/1 por el 5/4 en la composición de color de cocientes, se consigue una mayor precisión en los límites cartográficos de las andesitas anfibólicas del Cerro de los Frailes, el Cerro de los Lobos y la orla entre Punta Javana y Punta Chumba. Con similar distribución de colores, aunque quizás con mayor frecuencia de verdes oscuros, se muestran las dacitas y andesitas anfibólicas del Cerro Gallinaza, y con contactos mejor delimitados. Los tonos amarillos se distribuyen de manera más uniforme sobre las zonas de alteración intensa, mientras que las rocas menos alteradas toman tonos predominantemente azulados.

presencia simultánea de minerales arcillosos y óxidos de hierro. Aunque las zonas con asociaciones de minerales debidos a diferente intensidad de alteración muestran una distribución a gran escala apreciable en las imágenes, hay una gran variabilidad a escala de afloramiento. De ahí que dentro de las grandes unidades cartografiadas, exista una heterogeneidad que la resolución espacial de las imágenes TM no permite discriminar.

En las zonas más intensamente alteradas se da un enriquecimiento tanto en óxidos de hierro como en alunita y sílice. En el intervalo de longitudes de onda del visible, la limonita presenta una reflectancia baja, mientras que en la alunita sucede lo contrario (fig. 4). Parece que los efectos de la alta reflectancia relativa de la alunita y sílice predominan sobre la baja reflectancia de los minerales de hierro, puesto que la tendencia general es hacia valores altos.

La reflectancia espectral relativa de ambos compuestos se invierte en el infrarrojo medio. La limonita registra un tramo alto en su curva espectral, mientras que la alunita presenta picos de absorción. Puede que la mayor abundancia de sílice contribuya al balance hacia valores altos del conjunto, ante los efectos compensatorios de los dos grupos de minerales considerados anteriormente.

En las andesitas no alteradas, la presencia de piroxenos o anfíboles entre los fenocristales produce efectos reconocibles en bandas individuales. Las andesitas piroxénicas, de color muy oscuro al natural, como denotan los nombres toponímicos de algunos de sus afloramientos (Peñón Negro, Las Negras), presentan tonos comparativamente más oscuros en el visible respecto a las andesitas anfibólicas, y más claros en el infrarrojo (fig.2). Los piroxenos,

desprovistos de grupos OH, presentan una reflectancia más alta en el infrarrojo que los anfíboles, que sí cuentan con grupos OH en su estructura cristalina. Por ello las andesitas anfibólicas presentan tonos similares o más claros que las piroxénicas en el visible, y mucho más oscuros en el infrarrojo.

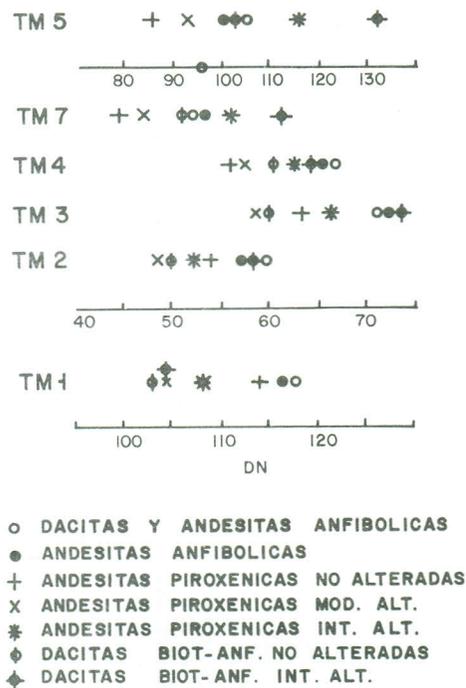


Fig.6: Representación de valores medios de DN en bandas individuales TM para distintos conjuntos litológicos.

La fig.6 expresa numéricamente las afinidades espectrales de los distintos grupos litológicos en bandas individuales.

Tal y como resulta de la observación visual de las imágenes, las andesitas anfibólicas del Cerro de los Frailes, y las dacitas y andesitas anfibólicas del Cerro Gallinaza se sitúan siempre muy próximas entre sí. En las bandas 1,2,3 y 4 son las rocas más claras, y pasan a tomar valores medios en las bandas 5 y 7.

En cuanto a las andesitas piroxénicas no alteradas, pasan de valores intermedios en el visible, a valores bajos en el infrarrojo.

Las dacitas biotítico-anfibólicas intensamente alteradas de Rodalquilar mantienen los valores más altos en todas las bandas, con la excepción de la banda 1. Le siguen en el intervalo de valores más claros las andesitas piroxénicas igualmente alteradas del Cerro de los Frailes en las bandas 5 y 7, pero ocupan valores intermedios en las bandas 1, 2, 3 y 4.

Los tipos petrográficos generales de dacitas y andesitas están muy mezclados entre sí, de modo que es imposible establecer comparaciones entre unos y otros, confirmando así las predicciones basadas en curvas espectrales de laboratorio.

2. Cocientes de bandas

La representación de valores medios de números digitales para las mismas áreas de ensayo (tabla 1, fig.7) despliega un panorama menos confuso. En los cocientes de bandas 5/7, 3/1 y 5/4 se observa la tendencia de las rocas alteradas a ofrecer valores más altos que las no alteradas. Esto está bien justificado por la mayor abundancia de minerales arcillosos y óxidos de hierro. Las andesitas anfibólicas del Cerro de los Frailes y las dacitas y andesitas anfibólicas del Cerro Gallinaza, se agrupan en valores bajos en los cocientes 5/7 y 5/4, hecho bien justificado por su escasez en los minerales antes mencionados, junto con las andesitas piroxénicas no alteradas, que les acompañan en el extremo de valores.

No es así en el cociente 3/1, donde las rocas anfibólicas se reúnen con las rocas intensamente alteradas, y dejan en el grupo de valores más bajos a las andesitas piroxénicas y las dacitas biotítico-anfibólicas que no han experimentado procesos de alteración.

Esta discrepancia entre los cocientes 3/1 y 5/4, ambos presuntamente relacionados con la abundancia de minerales ferruginosos, puede deberse a variaciones en abundancias relativas de unos componentes u otros en el conjunto de óxidos e hidróxidos de hierro que se producen por procesos de alteración hidrotermal o por efecto de la meteorización. Según estos resultados, las zonas ocupadas por rocas alteradas hidrotermalmente contienen predominantemente minerales ferruginosos que experimentan una absorción más acusada sobre 0.9 μm (banda 4). Parece haber una distribución más generalizada de compuestos que despliegan el descenso típico de los minerales ferruginosos sobre 0.55 μm (banda 1), no relacionados exclusivamente con procesos de alteración

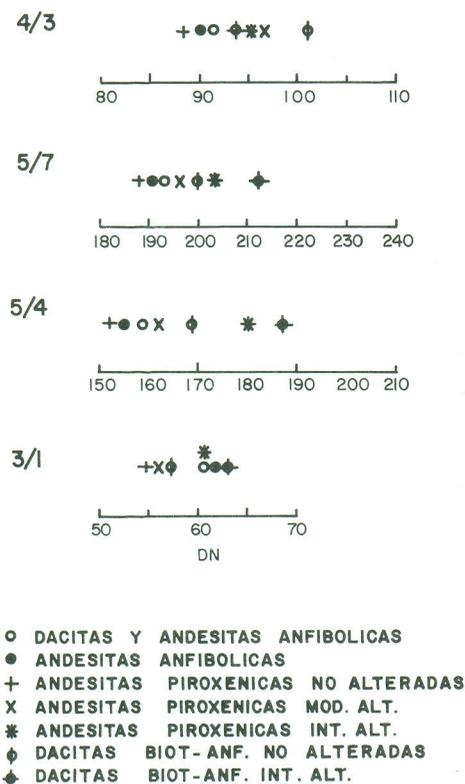


Fig.7: Representación de valores medios de DN en los cocientes de bandas de TM 5/7, 3/1, 5/4 y 4/3 para distintos conjuntos litológicos.

El tiempo a las bandas
 diferentes no alteradas. Para de
 valores aumentados en el intervalo
 valores bajos en el intervalo.

Las bandas hidrológicas
 diferentes alteradas de forma
 igualmente alteradas los valores más
 para mantener las bandas con la
 efecto en todas las bandas. La misma
 excepción de la banda 1. Se sigue
 en el intervalo de valores más
 alta en las bandas hidrológicas
 que en las alteradas del Grupo de
 las bandas en las bandas 2 y 3.
 los valores más altos en las
 las bandas 1, 2 y 3.

Los tipos hidrológicos generales
 de bandas y alteradas están muy
 marcadas entre sí de modo que es
 imposible establecer comparaciones
 entre unos y otros, confundiendo así
 las predicciones hechas en curvas
 experimentales de laboratorio.



- * BANDAS HIDROLÓGICAS
- * BANDAS HIDROLÓGICAS
- * BANDAS HIDROLÓGICAS DE ALTERADAS

La hidrológica de los ríos
 de las cuencas de los ríos de
 las cuencas de los ríos de
 las cuencas de los ríos de

1. Cuentas de bandas

La representación de valores
 de los números digitales para las
 bandas de ensayo (tabla 1).
 (Fig. 1) hechas en general según
 los datos de los contenidos de bandas
 2 y 3 y 4. Se observa la
 tendencia de las cosas alteradas a
 obtener valores más altos que las no
 alteradas. Esto está bien
 justificado por la mayor abundancia
 de minerales arcillosos y óxidos de
 hierro. Las alteradas hidrológicas
 del Grupo de los ríos y las
 bandas y alteradas hidrológicas del
 Grupo de las alteradas, se agrupan en
 valores bajos en los contenidos 2 y 3 y
 4. hechas justificado por los
 efectos en los minerales arcillosos
 mencionados, junto con las alteradas
 hidrológicas no alteradas, que las
 acompañan en el extremo de valores.

No se así en el contenido 2 y 3.
 donde las cosas hidrológicas de
 toman con las cosas hidrológicas
 alteradas y dejan en el grupo de
 valores más bajos a las alteradas
 hidrológicas y las bandas hidrológicas
 hidrológicas que no han experimentado
 procesos de alteración.

Esta discrepancia entre los
 contenidos 2 y 3 y 4, según presenta
 entre relacionados con la abundancia
 de minerales ferruginos, puede
 deberse a variaciones en abundancia
 relativa de unos componentes o
 otros en el conjunto de óxidos e
 hidroxidos de hierro que se producen
 por procesos de alteración
 hidrológica o por efecto de la
 meteorización. Según estos
 resultados, las zonas ocupadas por
 ríos alterados hidrológicamente
 contienen predominantemente minera-
 les ferruginos que experimentan
 una alteración más acusada sobre 0.3
 um (banda 4). Parece haber una
 distribución más generalizada de
 compuestos que se agrupan en el
 extremo típico de los minerales
 ferruginos sobre 0.55 um (banda
 2) no relacionados exclusivamente
 con procesos de alteración

R.P. 1977.- Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images. *Geophysics*, vol. 42, n. 3, (April 1977), 522-535.

ROWAN, L.C. y KAHLE, A.B. 1982.- Evaluation of 0.46 to 2.36 μ m multispectral scanner images of the East Tintic Mining District, Utah, for mapping hydrothermally altered rocks. *Economic Geology* vol. 77, 1982, 441-452.

ROWAN, L.C., ANTON-PACHECO, C., BRICKEY, D.W., KINGSTON, M.J., PAYAS, A., VERGO, N. y CROWLEY, J.K.

1987.- Digital classification of contact metamorphic rocks in Extremadura, Spain using Landsat Thematic Mapper data. *Geophysics*, vol. 52, n. 7 (July 1987), 885-897.

SANCHEZ CELA, V. 1968.- Estudio petrológico de las tobas dacítico-riolíticas de Las Negras (Almería). *Bol. Geol. y Min.*, t. LXXIX-I, 1968, 87-98.

SIEGAL, B.S., y GOETZ, A.F.H. 1977.- Effect of vegetation on rock and soil type discrimination. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, n. 2, Feb. 191-196.

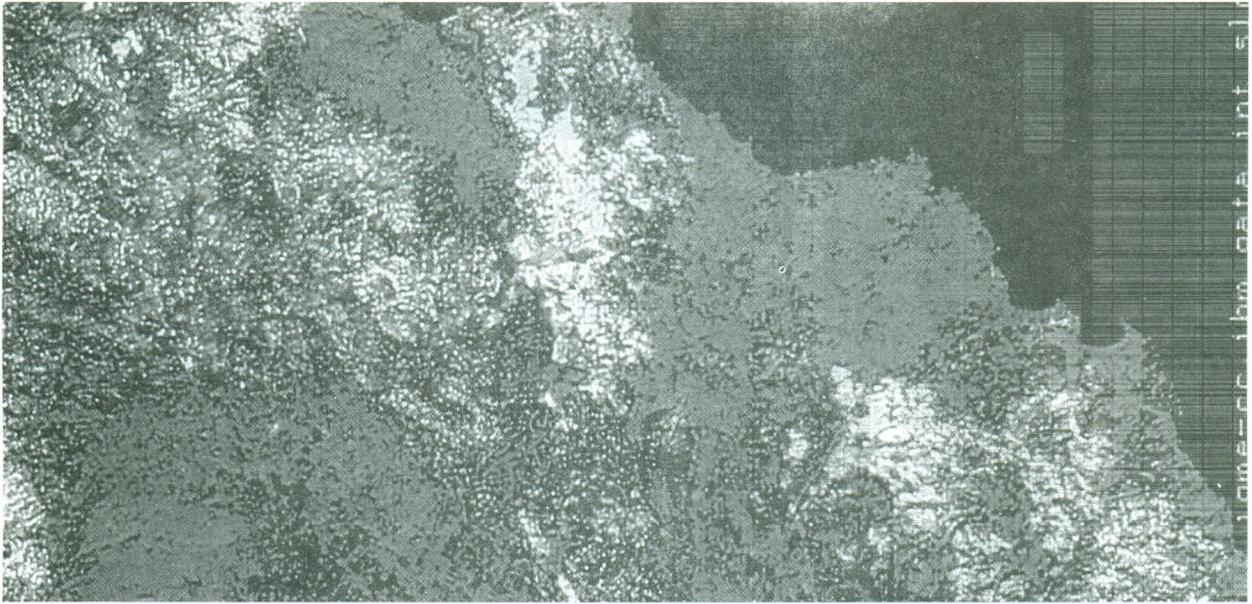


Foto 1.- Segmentación de intervalos de valores de número digitales sobre el cociente de bandas 5/4 del Thematic Mapper.
 Colores asignados a valores de bajos a altos: azul oscuro, azul claro, verde, magenta, y amarillo.
 Ver Foto color n.º 43 en página 377

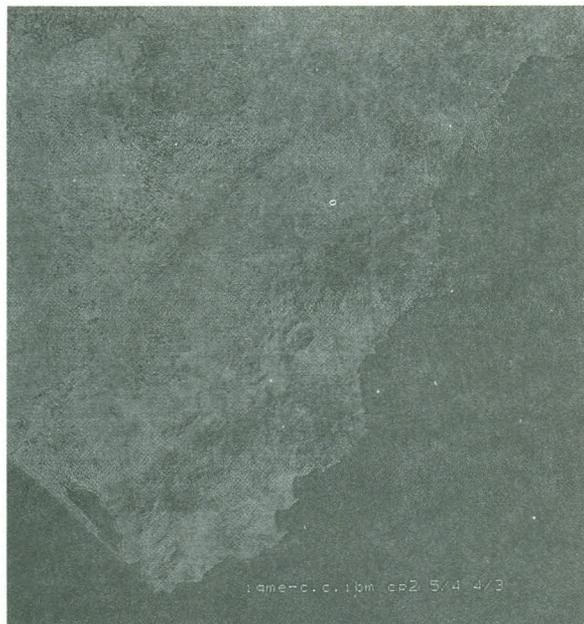


Foto 2.- Composición de color en tres bandas:
 rojo: segunda componente principal calculada sobre los cocientes 5/7 y 4/3 del Thematic Mapper
 verde: cociente 5/4
 azul: cociente 4/3
 Ver Foto color n.º 44 en página 377