

# *Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal*

J. R. RUIZ-ARMENTA y R. M. PROL-LEDESMA  
Instituto de Geofísica y Posgrado en Geofísica UACPyP, UNAM.  
Cd. Universitaria, México, D.F. C.P. 04510

## **RESUMEN**

La utilización de imágenes de satélite en las etapas tempranas de exploración de depósitos de origen hidrotermal ha tenido éxito en señalar zonas que presentan la ocurrencia de minerales de alteración hidrotermal y que tienen características estructurales favorables para la formación de yacimientos de importancia económica. En este trabajo se describen los métodos usados para efectuar el realce espectral y espacial de las imágenes que permiten distinguir las zonas que deben ser estudiadas con trabajo de campo a detalle. Las técnicas de realce espectral utilizadas permiten diferenciar las zonas que contienen minerales típicos de alteración hidrotermal de zonas cubiertas con vegetación que tiene una respuesta espectral similar. Estas técnicas incluyen el uso de componentes principales y decorrelación. El realce espacial efectuado tiene como objetivo el hacer más visibles las estructuras principales para determinar en cada zona las estructuras predominantes y evaluar las posibilidades de su relación con la mineralización. En el caso que aquí se presenta se hizo el análisis de la imagen correspondiente a la zona de estudio y se llevó a cabo la verificación de campo de las zonas identificadas en la imagen como favorable para la presencia de mineralización. La comparación de los resultados obtenidos en el campo tanto para el mapeo de alteración e identificación de estructuras principales con los obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes de satélite muestra la buena correlación que existe entre ambos conjuntos de resultados.

**Palabras clave:** Percepción remota, exploración minera, alteración hidrotermal, análisis multivariado.

## **ABSTRACT**

*Satellite images were used to identify areas with hydrothermally altered rocks that may be related with epithermal mineral deposits. A TM image from an area located in the western border of the Mexican Volcanic Belt that hosts precious metals and opal deposits. The mineralization is the result of the hydrothermal activity linked with the*

processes that formed the Sierra Madre Occidental during the Tertiary. Topographic features make exploration difficult, and the use of satellite images is necessary to establish target areas for detailed mapping. Samples were collected to characterize areas with hydrothermal alteration, and the localities were used as control points to evaluate the results from the processing of the TM image.

Principal components analysis was used in the image processing in order to differentiate the areas that contain hydrothermally altered rocks from areas covered with different types of vegetation that do not contain rocks with hydrothermal alteration minerals or their weathering products.

The comparison of the results obtained after the processing of the TM image with the data collected in the field yielded a good correlation. All the control points were identified in the processed images, and the erroneous identification of crop fields and young lava flows in the early stages of processing was avoided in the last stage with the overlay of the images where oxide and hydroxyls were highlighted.

**Key words:** Remote sensing, ore deposits, exploration, hydrothermal alteration, multivariate analysis.

## INTRODUCCIÓN

Los métodos de exploración de yacimientos de origen hidrotermal utilizando imágenes de satélite se basan en las características superficiales de este tipo de depósitos que permiten determinar zonas favorables para su localización. Entre los diferentes factores que influyen en las condiciones físico-químicas predominantes en los ambientes hidrotermales y que finalmente determinan los sitios y el carácter de la mineralización, el ambiente estructural y tectónico son los más importantes en la primera etapa de exploración (escala regional). En tanto que la presencia de alteración hidrotermal es más relevante cuando la exploración es a escala de proyecto. Aunque estos efectos de alteración pueden ayudar a la localización de áreas favorables, un prospecto ocupa únicamente una pequeña parte de esta área, por lo que las zonas de alteración muy extensas pueden dificultar la exploración.

A escala de proyecto los estudios estructurales son también muy útiles. Sin embargo, muchas de las estructuras mapeadas no están mineralizadas, por lo que es necesario separar las más favorables analizando la correspondencia entre las estructuras geológicas y los datos disponibles de geoquímica, ocurrencia mineral y alteración hidrotermal. La conjunción favorable de estos factores hace que la zona se vuelva un prospecto interesante para su exploración.

Actualmente el mapeo de alteración es posible con sensores que pueden detectar la presencia de grupos de minerales característicos de las zonas de alteración con base en los rasgos espectrales de los mismos en la parte visible e infrarrojo cercano (0,4-1,1  $\mu\text{m}$ .) del espectro electromagnético. Dispositivos, tales como el Landsat Thematic Mapper (TM), pueden discriminar entre diferentes litologías y mapear la distribución de diferentes grupos de minerales como son arcillas, sulfatos, carbonatos, óxidos, etc. El Landsat-TM también es muy útil

para el mapeo de reconocimiento e identificación regional de estructuras. Otra característica de las imágenes del TM es que estas están disponibles a un precio razonable si consideramos la opciones existentes para el mapeo de grandes áreas (una imagen TM cubre 185 x 185 km.).

De acuerdo a los objetivos de exploración del área, el uso conjunto de datos de percepción remota y del procesamiento digital de imágenes es una herramienta efectiva y eficiente para el mapeo de reconocimiento y localización de posibles zonas mineralizadas.

La exploración del área estudio, tiene como objetivo principal, la localización y delineación de áreas con mayor posibilidades de contener yacimientos minerales de origen hidrotermal. La selección del método de exploración se hizo con base en las principales características de los yacimientos buscados, así como de la calidad de los resultados obtenidos y de la optimización de tiempo y de los recursos tanto económicos como humanos.

## ÁREA DE ESTUDIO

Con base en las características del arco magmático en la parte occidental de México y los yacimientos minerales relacionados a este ambiente tectónico, se seleccionó la región del volcán Ceboruco en el estado de Nayarit por presentar una geología favorable para encontrar el tipo de yacimientos minerales buscados.

El área de estudio se localiza en la parte SSW del estado de Nayarit y en el límite NNW del estado de Jalisco. Políticamente se ubica en los municipios de Ahuacatlán, Ixtlán del Río y Amatlán de Cañas del estado Nayarit, entre los paralelos 20°53' y 21°12' de latitud norte y los meridianos 104°20' y 104°38' de longitud oeste con una superficie de 1.165.8 km<sup>2</sup> (30.7 x 37.9 km.) (figura 1).

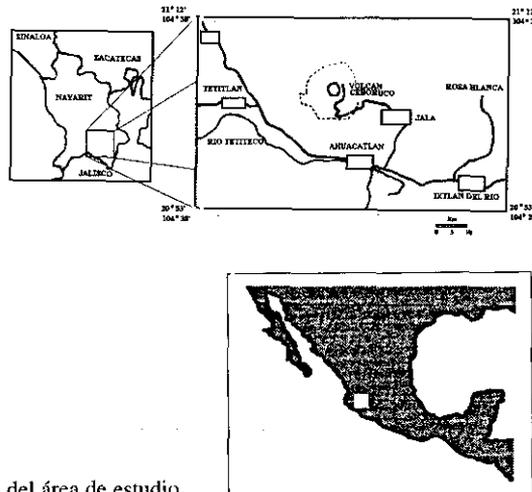


Fig. 1. Localización del área de estudio.

### *Ambiente Geológico*

El área de estudio se sitúa en la parte noroccidental de la provincia del Eje Neovolcánico, específicamente en el llamado Graben Tepic-Chapala y está delimitada por el volcanismo ácido de la Provincia de la Sierra Madre Occidental. Al sur, esta actividad volcánica se manifiesta en forma de intrusiones graníticas. Otros tipos de rocas presentes en el área son de tipo sedimentario y metamórfico.

La provincia de la Sierra Madre Occidental es uno de los mayores rasgos volcánicos del mundo con una superficie aproximada de 275.000 km<sup>2</sup> (Salas, 1975). Esta provincia es una pila masiva de rocas volcánicas casi horizontales que sirven de base a una extensa planicie la cual muestra diferentes grados de disección y un fuerte control estructural de la morfología. Su eje corre de NW a SE desde la frontera de Estados Unidos de Norteamérica hasta la ciudad de Guadalajara en el estado de Jalisco. La parte axial tiene de 200 a 300 km. de ancho, aunque los productos magmáticos que la flanquean ocupan una zona mucho más amplia. De acuerdo a su fisiografía, ésta consiste de una gran elevación con un promedio de 1.500 a 2.500 m.s.n.m. encontrándose elevaciones de más de 3.000 m.s.n.m..

Los contornos de las elevaciones muestran un arco estructural pronunciado en el basamento a lo largo de la Sierra (Wisser, 1966), la cual está arqueada por anticlinales locales superpuestos, domos y depresiones. Clark (1979) sugiere que por lo menos algunos de los anticlinales y domos locales están relacionados al emplazamiento de plutones. El arqueamiento y los domos locales a lo largo de la sierra produjeron un juego conjugado de fallas de tensión con una dirección principal NW-SE, que fueron mineralizadas e intrusionadas por diques andesíticos y riolíticos.

La provincia del Eje Neovolcánico constituye una franja compuesta principalmente por rocas volcánicas de composición andesítica y dacítica del Mioceno al Holoceno (Gunn y Mooser, 1970). Tiene una área aproximada de 185.160 km<sup>2</sup> (Salas, 1975) y una longitud de 1.000 Km. El Eje Neovolcánico cruza la República Mexicana en dirección E-W entre los paralelos 19° y 21° de latitud norte desde San Blas (Nayarit) en el Pacífico hasta Jalapa (Veracruz) en el Golfo de México. Su parte occidental se caracteriza por la presencia de dos fosas tectónicas: la de Tepic-Chapala, orientada NW-SE y la de Colima con una orientación N-S. Ambas fosas se unen en la región ubicada al sur de la ciudad de Guadalajara, donde una sucesión de lagunas constituye el testigo de esta tectónica distensiva (Demant, 1978).

### *Geología local.*

Hacia la parte N-NE y E del área de estudio la provincia de la Sierra Madre Occidental constituye masas alargadas con dirección NW-SE y N-S, cuyas elevaciones tiene un promedio de 1.500 a 2.740 m.s.n.m. a partir del Valle de Jala. Hacia la parte sur las rocas de esta provincia se encuentran intrusionadas por cuerpos graníticos, metamorfozadas y plegadas con elevaciones de 1.000 a 2.320 m.s.n.m. (Sierra el Guamuchil). En la parte central del área

se presentan bloques de rumbo NW-SE basculados al NE y semicubiertos por derrames básicos del Plio-Cuaternario (Valle de Jala y Ahuacatlán) (Romero *et. al.*, 1991).

La provincia del Eje Neovolcánico ocupa la parte central y noroeste del área, además de presentar pequeños afloramientos en la porción sur. Los elementos que componen la geomorfología de esta provincia son los valles y los centros volcánicos.

Dentro de los valles se tiene el de Jala con 1.100 m.s.n.m. en el centro del área y el Valle de Amatlán de Cañas en la parte sur. Los centros volcánicos son estratovolcanes como el Ceboruco con una elevación de 2.880 m.s.n.m. y conos cineríticos los cuales se localizan como conos satélites de los estratovolcanes o aislados, pero siempre alineados a ellos.

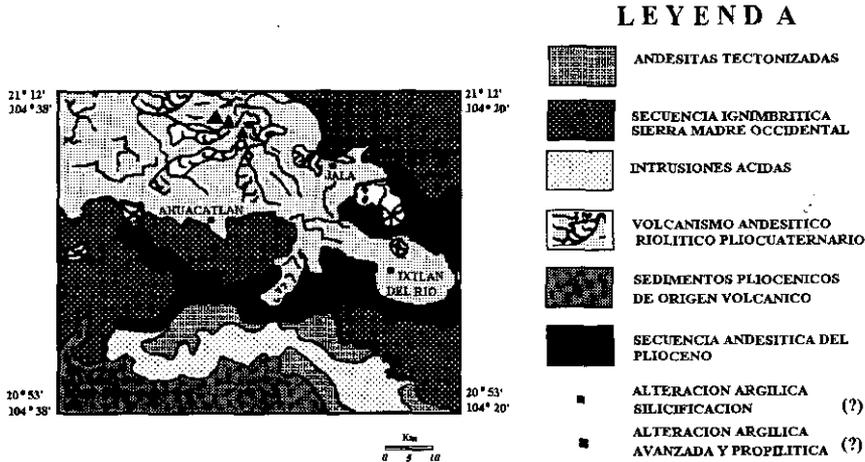


Fig. 2. Mapa geológico simplificado y zonas de alteración del área del Ceboruco. (Tomada de: Romero *et al.*, 1991).

La secuencia estratigráfica se encuentra constituida casi en su totalidad por rocas de origen ígneo (con edades que varían desde el Terciario al Reciente); sin embargo, también se tienen rocas sedimentarias y metamórficas. La distribución espacial de las diferentes unidades litológicas está dada de la siguiente forma: en la porción NNE, se encuentran expuestas las rocas pertenecientes a la secuencia de la Sierra Madre Occidental, mismas que hacia la parte SSW son afectadas por eventos intrusivos que han dado origen a metamorfismo de contacto. Por otro lado, hacia la porción central se puede observar un corredor de orientación NW-SE compuesto en su totalidad por una secuencia volcánica Plio-Cuaternaria (figura 2).

#### *Tectónica local.*

El área de estudio se caracteriza por la presencia de las depresiones tectóni-

cas del Ceboruco y Amatlán de Cañas que presentan estructuras de semi-graben limitados por fallas lístricas. La depresión del Ceboruco está formado por una falla normal lístrica principal y otras dos paralelas con rumbo N120E y buzamiento SSW. La falla más oriental desplaza un mínimo de 500 m al bloque SW produciendo un basculamiento de 20° (figura 3). Sobre los bloques formados por estas fallas ha crecido el volcán Ceboruco. La depresión parece estar más ancha y más profunda hacia el oeste de acuerdo al hecho de que, en esta área se suman el efecto de todas las fallas. La edad de desarrollo de ésta depresión, parece haber ocurrido en el Mioceno Superior o en el Plioceno Inferior. Posteriormente, la deformación extensional parece haber emigrado hacia el sur (depresión de Amatlán de Cañas) (Ferrari *et al.*, 1993). La depresión de Amatlán de Cañas está formada por una gran falla lístrica de dirección N150E en su parte oriental y N80E en la parte occidental. Esta estructura hunde casi 1.000 m el bloque meridional que está basculado en un promedio de 20° al NNE (figura 3). El conglomerado Cuaternario que rellena la depresión se encuentra también basculados y ligeramente afallados. Esta depresión ha sido tectónicamente activa en el Cuaternario y posiblemente se encuentra todavía activa (Ferrari *et al.*, 1993).

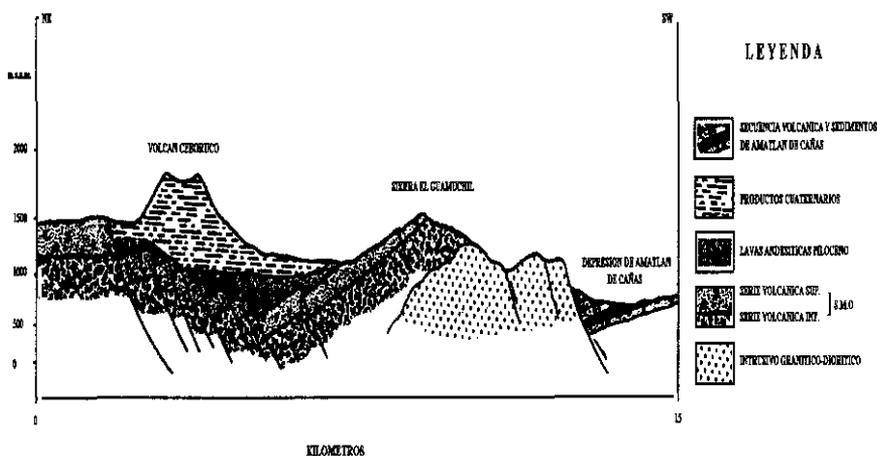


Fig. 3. Sección geológica esquemática entre el volcán Ceboruco y Amatlán de Cañas. (Tomada de: Ferrari *et al.*, 1993).

#### *Alteración hidrotermal y mineralización.*

De los trabajos de campo realizados en el área, se reconocieron zonas de alteración hidrotermal en Jala, Jomulco, Rosa Blanca y la Sierra El Guamuchil (figura 2), en esta última se observó que están relacionadas con emplazamientos de cuerpos intrusivos. Dicha alteración se manifiesta principalmente en las rocas ácidas de la Sierra Madre Occidental y su ocurrencia principal es a lo largo del sistema de fracturas de dirección NW-SE y NE-SW.

En el área de Jala y Jomulco, se presenta alteración argílica (?) en flujos piroclásticos y de caída (1.300 m.s.n.m.). A los 1.220 m.s.n.m. se tiene silicificación de la zona argilizada en las rocas de la Sierra Madre Occidental. Esta zona de alteración se encuentra muy oxidada y fracturada. En el área de Rosa Blanca-Los Aguajes las rocas de las minas de ópalo se encuentran muy alteradas, principalmente a arcillas y óxidos. La alteración es semejante a la del área de Jala y Jomulco.

Sobre el camino Ahuacatlán-Amatlán de Cañas (que cruza la Sierra El Guamuchil), se localizan rocas muy fracturadas con abundante depositación de calcita y arcillas (1.215 m.s.n.m.); en rocas andesíticas se presenta alteración argílica avanzada (?) color rojo con pocos cristales de epidota (1.250 m.s.n.m.). Sobre planos de falla con rumbo N30E se tiene alteración propilítica (?) en andesitas con vetas de cuarzo oxidadas de unos cuantos milímetros hasta 10 a 15 cm de espesor. A los 1.055 m.s.n.m. se presenta alteración propilítica (?) con abundante clorita y silicificación. En esta zona (Sierra El Guamuchil) la alteración se presenta generalmente relacionada con las estructuras NW-SE.

Las mineralizaciones económicas en el área consisten de ópalo (área de Jala-Jomulco y Rosa Blanca-Los Aguajes) y de oro y plata nativos (área de El Pilón y El Molinete en la Sierra El Guamuchil). Las minas de ópalo se localizan en la parte N-NE del área, presentan vetas de cuarzo calcedónico que siguen el tren de falla NW. Las rocas de estas minas se encuentran muy fracturadas y con alteración supergénica (oxidación intensa). Las minas del área de El Pilón presentan vetas de cuarzo (10 cm) con puntos de electrum (?) y cristales de piritita oxidada. La roca se presenta muy silicificada (casi toda la matriz es cuarzo). En el área del Molinete se presentan rocas propilitizadas (?) con alteración supergénica (oxidación intensa). En las minas del área se observan vetas de cuarzo de hasta 30 cm de espesor.

De acuerdo a las observaciones de campo la mineralización presenta las siguientes características:

1. La roca encajonante es de edad Terciario Medio, perteneciente a la pila volcánica calci-alcalina de la Sierra Madre Occidental dentro de la parte más baja de la Serie Volcánica Inferior. Delgado (1979) sugiere que la mineralización está genéticamente relacionada a eventos de tipo intrusivo de composición ácida (área de El Pilón y Barranca de Oro).

2. La mineralización se presenta rellenando zonas de fractura, que pueden ser atribuidas al levantamiento de la secuencia volcánica de la Sierra Madre Occidental, aunque su relación genética con rasgos tectónicos locales no es obvia en los afloramientos observados.

3. La mineralización ocurre dentro de vetas de cuarzo. Las vetas presentan una mineralogía consistente de electrum (?), granos de piritita oxidada, oro y plata nativos (área de El Pilón).

4. El sistema de fallas de dirección NW-SE y NE-SW parecen ejercer un fuerte control estructural en el emplazamiento de la mineralización.

## MÉTODOS DE PROCESAMIENTO

El procesamiento de los datos de percepción remota fue limitado a una sub-imagen de 10.241.265 pixels (aproximadamente 116.824 km<sup>2</sup>) del cuadrante SW de la imagen Thematic Mapper (TM) (path 030, row 045). La imagen fue procesada en una computadora personal con procesador 486, 22 Mb de memoria RAM, sistema operativo MS-DOS versión 6.0, 250 Mb en disco duro, monitor a color super VGA con resolución de 1024 x 768 con despliegue de 256 colores, tarjeta de video con 1 Mb y unidad de disco flexible de 3.5" de 1.4 Mb. Se emplearon los paquetes de procesamiento de imágenes IDRISI Versión 4.0 desarrollado por la «Graduate School of Geography» de la Universidad de Clark y el Sistema Personal Interactivo en Percepción Remota (SPIPR) Versión 2.0 desarrollado por el Centro Científico IBM de México y el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI).

La selección de las técnicas del procesamiento digital de imágenes utilizadas se hizo tomando en cuenta los objetivos particulares del estudio y de los algoritmos disponibles para el procesamiento.

### *Análisis estadístico.*

El análisis estadístico de la imagen Ceboruco se realizó a partir del cálculo de las estadísticas univariadas y multivariadas de las bandas contenidas en la imagen.

La estadísticas univariadas y multivariadas para las seis bandas no térmicas de la imagen Ceboruco son resumidas en la Tabla 1.

**TABLA 1**  
Estadísticas univariadas y multivariadas de las seis bandas no térmicas de la imagen Ceboruco

N.º de bandas	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Media	88,29	38,85	52,78	60,31	111,04	54,89
Des. estándar	10,65	7,11	13,84	13,55	29,78	16,94
Varianza	113,63	50,66	191,81	183,66	887,32	287,27
Mínimo	56	17	17	11	8	3
Máximo	178	89	146	164	255	255
<b>Matriz de Varianza-Covarianza</b>						
TM1	113,63	—	—	—	—	—
TM2	73,00	50,66	—	—	—	—
TM3	138,62	96,26	191,81	—	—	—
TM4	77,03	64,83	121,23	183,66	—	—
TM5	238,60	169,18	349,34	263,88	887,32	—
TM7	156,75	105,32	212,78	120,59	469,84	287,27
<b>Matriz de Correlación</b>						
TM1	—	—	—	—	—	—
TM2	0,96	—	—	—	—	—
TM3	0,93	0,97	—	—	—	—
TM4	0,53	0,67	0,64	—	—	—
TM5	0,75	0,79	0,84	0,65	—	—
TM7	0,86	0,87	0,90	0,52	0,93	—

El análisis de las estadísticas univariadas y multivariadas de la Tabla 1 muestran que las bandas TM1, TM2 y TM3 contienen un rango de valores de brillantez bien distribuidos, con un valor de brillantez mínimo relativamente grande. Generalmente, los datos grabados en la región del visible (p.e. las bandas TM1 a TM3) presentan esta característica debido al incremento de la dispersión atmosférica que ocurre en esta región del espectro electromagnético. Las bandas TM4, TM5 y TM7 muestran una distribución de valores de brillantez que ocupa casi en su totalidad el rango disponible de valores (0-255). Este comportamiento (de presentar un valor mínimo cercano a cero), de las bandas del infrarrojo es debido a que la dispersión atmosférica tiende a restar brillantez a los datos grabados en estas longitudes.

La matriz de varianza-covarianza muestra una pequeña covarianza de la banda TM2 (verde). La banda TM2 es significativamente más baja en contraste que las bandas adyacentes TM1 (azul) y TM3 (rojo). La banda TM5 (infrarrojo medio) presenta la varianza más alta causada por las diferencias en la respuesta espectral entre los diferentes materiales que componen la escena.

La matriz de correlación muestra la alta correlación de las bandas contiguas TM1, TM2 y TM3 en la parte visible del espectro electromagnético, lo que indica que estas bandas contienen información redundante. Las bandas del infrarrojo (TM4, TM5 y TM7) muestran una correlación media lo que hace suponer la existencia de información no redundante entre ellas. Las bandas TM5 y TM7 presentan una correlación muy alta (93%). La correlación más baja se presenta entre la banda TM4 y TM7 (52%) (debido a que la banda TM4 es característica de la vegetación, en tanto que la banda TM7 es más apropiada para la diferenciación de materiales geológicos). Por lo que se puede argumentar el uso de estas bandas para separar materiales que presenten una respuesta espectral característica en dichas bandas.

### *Preprocesamiento.*

Para corregir los errores generalmente presentes en las imágenes de percepción remota, se analizaron visualmente las imágenes de cada una de las bandas. Este análisis muestra que no es necesaria la aplicación de procesos de corrección a las imágenes de cada banda debido a que no se presentan dichos errores. En cuanto a la corrección de los errores causados por la dispersión atmosférica, se estimaron las correcciones para cada banda a partir del análisis de las estadísticas univariadas de la Tabla 1 y se corrigieron los datos que componen las imágenes. Los valores máximos y mínimos de las imágenes originales y corregidas son mostrados en la Tabla 2.

**TABLA 2**  
**Valores de máximos y mínimos de las bandas originales y corregidas**  
**por dispersión atmosférica de la imagen Ceboruco**

Bandas originales	Máximo	Mínimo	Bandas corregidas	Máximo	Mínimo
TM1	178	56	TM1	122	0
TM2	89	17	TM2	72	0
TM3	146	17	TM3	129	0
TM4	164	11	TM4	153	0
TM5	255	8	TM5	247	0
TM7	255	3	TM7	252	0

Debido a que los errores geométricos no afectan la respuesta espectral de los datos de las bandas y no influyen en los resultados de los procesos de realce no se aplicó corrección geométrica a la imagen. Además de que esta corrección se puede aplicar después de finalizado el análisis de la imagen.

#### *Realce digital.*

Las técnicas de realce digital tanto espacial como espectral se usan directa o indirectamente para extraer información de las imágenes multispectrales para la solución de problemas específicos. Estas técnicas se basan en la relación que existe entre la composición de los diferentes materiales que constituyen la escena y su respuesta espectral en cada una de las bandas que componen la imagen. El objetivo principal de aplicar las técnicas del realce digital a la imagen Ceboruco es el de mapear áreas con alteración hidrotermal y estructuras geológicas a partir de la extracción de la información espacial y espectral contenida en la imagen.

Las imágenes del Sistema Landsat Thematic Mapper (TM) presentan una mejor resolución tanto espacial como espectral en comparación con las imágenes del Sistema Landsat Multispectral Scanner (MSS). El mejoramiento en la resolución espacial del Thematic Mapper es muy útil cuando se desea hacer un mapeo detallado de la información concerniente a la alta frecuencia espacial relacionada a rasgos estructurales entre otros. En tanto que el mejoramiento en la resolución espectral es muy útil para mapear diferentes tipos de cobertura, porque las diferencias que ocurren a través del espectro electromagnético son críticas en la identificación y/o separación de los diferentes tipos de cobertura presentes en el terreno. Sin embargo, el uso de las imágenes Landsat-TM para el mapeo de diferentes tipos de cobertura presenta el inconveniente de obtener la mayor cantidad de información posible dentro de un reducido subconjunto de imágenes para el análisis digital y/o de composición de color (p.e. tres imágenes para una composición en color). Con varias bandas espectrales disponibles (7 en total), los usuarios por lo general están interesados en la información intrínseca en cada banda espectral y en la comparación de la información común a todas las bandas. El mapeo de esta diferencia espectral o «contraste» y la causa de esta diferencia pueden ser importantes en muchas aplicaciones.

### *Realce espectral para el mapeo de alteración hidrotermal.*

Las rocas que circundan los yacimientos minerales de origen hidrotermal casi siempre muestran los efectos de las reacciones que resultan de la tendencia de los fluidos calientes a equilibrarse con las rocas a través de los cuales se mueven. Los efectos de estas reacciones son llamados alteración de la roca encajonante y el volumen que esta ocupa zona de alteración.

La alteración son los cambios en la composición mineralógica de la roca ocasionados por los cambios físicos y químicos producidos por la acción de los fluidos hidrotermales. Los minerales de alteración pueden ser considerados como el resultado de los procesos de mineralización como son los yacimientos minerales en sí.

Tres amplios grupos de minerales son característicos de la alteración hidrotermal: los hidroxilos (arcillas y micas), minerales de hierro (hematita, goethita y jarosita) y los sulfatos hidratados (yeso y alunita). Algunos de estos minerales como la alunita y la jarosita se forman únicamente durante los procesos de alteración hidrotermal, mientras que otros minerales como la caolinita y la hematita pueden formarse como productos de intemperismo.

Otro aspecto importante de la alteración es su zonificación (figura 4). La zonificación generalmente representa la transición química y mineralógica de la roca original exterior hacia el interior del cuerpo mineralizado. Cada zona tiene sus minerales diagnósticos que la separa de las zonas adyacentes (Tabla 3). Los minerales marcados con asteriscos producen rasgos espectrales característicos en la región del infrarrojo cercano e infrarrojo medio como consecuencia de procesos electrónicos y vibracionales.

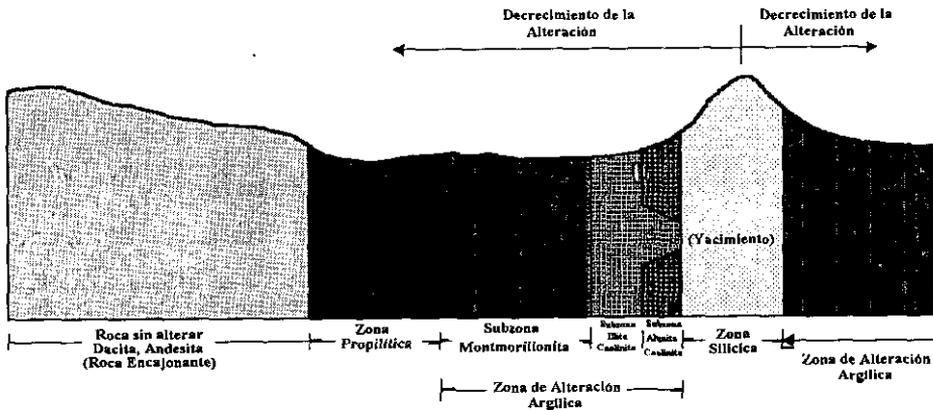


Fig. 4. Modelo de una sección de la zona de alteración de un sistema hidrotermal típico. (Tomada de: Sabins, 1987; Ashley, 1974).

Las características espectrales de los óxidos de hierro relacionados a expresiones superficiales de áreas mineralizadas (p.e. gossan y halos de alteración) los cuales presentan rasgos característicos en la región del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético (0,4-1,1 m.), así como de los minerales de la Tabla 3 y la vegetación, (esta última por la fuerte respuesta espectral que presenta en la región del visible e infrarrojo cercano, lo que interfiere en la identificación e interpretación de los óxidos de hierro y por su intensa cobertura en la región) proveen las bases físicas para el mapeo de zonas alteradas.

**TABLA 3**  
**Asociaciones minerales presentes en las zonas de alteración hidrotermal de los principales tipos de rocas encajonantes**

ZONA	MINERALOGÍA
Propilítica	Sericita*, Albita, Feldespatos-K, Biotita*, Siderita*, Pirita, Pirrotita, Hematita, Ankerita, Calcita*, Montmorillonita*, Zeolita, Epidota*, Clorita*.
Argílica	Caolinita*, Montmorillonita*, Pirita.
Fílica	Sericita*, Topacio, Turmalina.
Argilización Avanzada	Caolita*, Alunita*, Pirofilita*, Pirita.
Potásica	Sericita*, Calcita*, Ankerita, Pirita, Biotita*, Feldespatos-K, Hematita, Siderita*, Clorita*.
* <i>Minerales con rasgos espectrales en el infrarrojo cercano y medio.</i>	

La región de El Ceboruco esta constituida en su mayor parte por rocas de origen ígneo y en algunas localidades estas rocas han sido alteradas por fluidos hidrotermales. Estas zonas de alteración contienen yacimientos de minerales económicos (ópalo en el área de Jala-Jomulco y Rosa Blanca y oro en la zona de El Pilón, El Carretón en la Sierra El Guamuchil) que han sido y son explotados en forma sistemática por gambusinos. Los afloramientos de rocas constituyen la menor proporción de la superficie observable, la mayor parte consiste de vegetación (cubre aproximadamente del 70 al 85% de la superficie) compuesta principalmente por arboles pequeños (Sierra Madre Occidental y Sierra El Guamuchil) y matorrales (Valle de Jala).

La alteración se indica frecuentemente por la presencia de óxidos de hierro y minerales arcillosos (hidroxilos). Cuando los minerales de óxidos de hierro están presentes el color de la roca es café, rojo, anaranjado o amarillo y si están presentes minerales arcillosos el color es verde claro, crema, amarillo pálido y violeta claro.

La abundancia de los minerales de hierro en las rocas alteradas ayuda en la localización de estas, dado que estos minerales afectan fuertemente la porción de 0,4 a 1,1 mm. de la región del visible e infrarrojo cercano (VIRc). La figura 5

muestra los rasgos espectrales debido a transiciones electrónicas de los minerales de hierro que se presentan comúnmente en las rocas alteradas en el rango de 0,35 a 1,5 mm. (Hunt y Ashley, 1979). El espectro de la jarosita muestra un rasgo bien definido que ocurre al lado de una absorción muy amplia cuyo mínimo se localiza en 0,43 mm.; el de la hematita se caracteriza por el aumento de la reflectancia en las longitudes de onda cortas hasta un máximo cerca de 0,75 mm. y un mínimo que ocurre generalmente en 0,85 mm. La presencia de anomalías de reflectancia en la banda cerca de 0,9 mm. es un indicador confiable de los minerales formados principalmente por hierro-férrico. Si las anomalías se centran en las longitudes de onda más pequeñas que 0,9 mm., el mineral predominante es generalmente hematita. Si la anomalía está centrada en 0,9 mm. o en valores mayores que esta longitud de onda el mineral dominante es usualmente jarosita o goethita. La presencia de la jarosita puede ser definida por el rasgo de absorción en 0,43 mm.

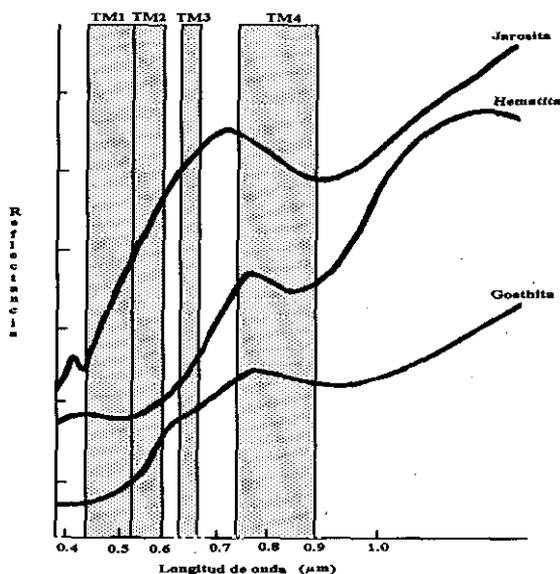


Fig. 5. Curvas de reflectancia espectral de óxidos de hierro.

Las transiciones vibracionales que se presentan en la región entre 1,1 y 2,5 mm. proporciona más información espectral sobre la composición de minerales y rocas que el rango del visible e infrarrojo cercano. Esta región se caracteriza por los altos valores de reflectancia de la mayoría de los tipos de rocas (basaltos, gabros, etc.) y minerales (arcillosos, sulfatos, filosilicatos, etc.) alrededor de 1,65 mm., y por fuertes rasgos de absorción para la banda centrada alrededor de 2,2 mm. (Goezt y Rowan, 1981) (figura 6).

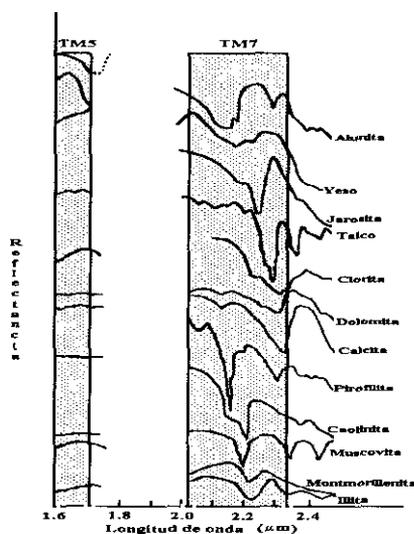


Fig. 6. Curvas de reflectancia espectral de minerales arcillosos, filosilicatos, carbonatos y sulfatos.

La vegetación presenta rasgos de absorción de 0,45 a 0,68 mm. y alta reflectancia en el infrarrojo cercano llamada meseta. Los rasgos de reflectancia en 1,6 mm. y 2,2 mm. indican el contenido de agua en las hojas. Los rasgos de absorción alrededor de 1,4 mm. y 1,9 mm. son debido a la presencia de agua en las hojas (figura 7) al igual que los minerales que contienen moléculas de agua en sus estructura.

Del análisis de las figuras 5, 6 y 7 se observa que la región cubierta por la banda TM3 (0,63-0,69 mm.) presenta una alta reflectancia para los minerales

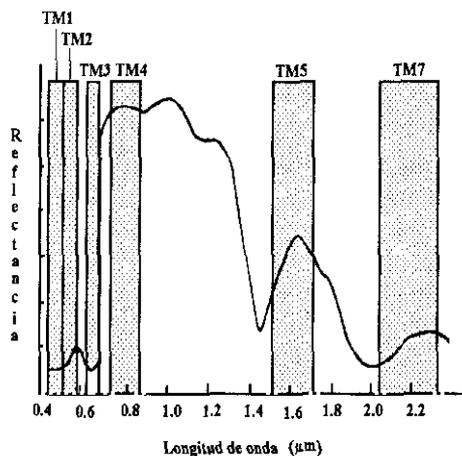


Fig. 7. Curva de reflectancia espectral de la vegetación.

de óxidos de hierro y una fuerte absorción para la vegetación lo cual puede ser utilizado para separar estos materiales. La banda TM4 (0,76-0,90 mm.) incluye el llamado «límite rojo» que es un rasgo de gran reflectancia característico de la vegetación, así como la banda de absorción de los minerales de hierro en 0,90 mm. lo que produce una respuesta espectral diferente para estos dos materiales. Sin embargo, esta banda es más representativa de las características espectrales de la vegetación.

En las bandas TM1 (0,45-0,52 mm.) y TM2 (0,52-0,60 mm.) tanto la vegetación como los minerales de hierro presentan rasgos muy similares en su respuesta espectral por lo que en estas bandas se dificulta la separación de estos materiales. Las bandas TM5 (1,55-1,75 mm.) y TM7 (2,08-2,35 mm.) muestran una buena separación tanto de la vegetación como de los óxidos de hierro e hidroxilos con base en las diferencia en la forma de sus curvas espectrales. La Tabla 4 resume las características de reflectancia para óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación obtenidas a partir del análisis de sus curvas espectrales.

No obstante, el ancho de las bandas de TM no permiten la discriminación entre los distintos minerales, pero si hacen posible la detección de casi todos los grupos de minerales que contienen los iones y moléculas mencionados previamente. Sin embargo, los rasgos espectrales que ocurren en las rocas alteradas son producto tanto de procesos electrónicos como vibracionales que involucran principalmente al grupo de los óxidos de hierro y el de los hidroxilos.

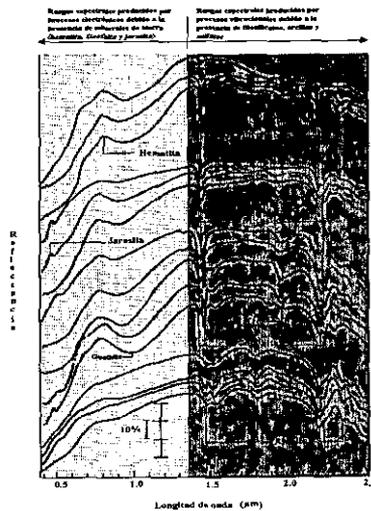


Fig. 8. Espectro de rocas clasificadas con alteración argílica avanzada en el rango espectral de 0.35 a 2.5 m. Los rasgos vibracionales son debido a la presencia de minerales como la caolinita, micas potásicas, pirofilita y alunita en tanto que los procesos electrónicos son debidos al grupo de los óxidos (hematita, goethita y jarosita). Los espectros están desplazados verticalmente y arreglados de acuerdo a la similitud de cada uno de ellos. (Tomada de: Hunt y Ashley, 1979).

La figura 8 muestra las curvas espectrales de rocas con alteración argílica avanzada (Hunt y Ashley, 1979) en la que se puede observar que el espectro de las rocas alteradas es una combinación de los rasgos espectrales individuales de los minerales de óxidos de hierro (hematita, goethita y jarosita) y del grupo de los hidroxilos (micas potásicas, caolinita, alunita y pirofilita).

Investigaciones iniciales usando cocientes de bandas y su composición en color para identificar y mapear zonas de alteración dentro del área de estudio producen resultados confusos; el contenido de vegetación a nivel de subpixel se ha considerado la causa de este problema. La técnica de Análisis de Componentes Principales Dirigidas (ACPD), y la Técnica de Crosta (Análisis de Componentes Principales Orientadas) basadas en el Análisis Selectivo de Componentes principales desarrollado por Chavez Jr. y Yaw Kwarteng (1989) fueron aplicadas para separar la respuesta de los óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación. La selección de las bandas para el análisis de componentes principales se hizo en base a las características espectrales mostradas en la Tabla 4.

**TABLA 4**  
Características espectrales para óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación

MATERIALES	REFLECTANCIA	ABSORCIÓN
MINERALES ARCILLOSOS, CARBONATOS, FILOSILICATOS Y SULFATOS	TM5*	TM7*
HEMATITA	TM3	TM2* TM1
GOETHITA	TM3* TM2	TM1
JAROSITA	TM3* TM2 TM1	
VEGETACIÓN	TM4* TM2 TM5 TM7	TM3 TM1

\* Bandas con los rasgos espectrales más característicos.

#### *Análisis Selectivo de Componentes Principales.*

La diferencia entre el Análisis Estándar de Componentes Principales y el Análisis Selectivo de Componentes Principales es que en el análisis estándar todas las bandas disponibles de la imagen son usadas como entrada para la

transformación de componentes principales, mientras que en el análisis selectivo únicamente un subgrupo de bandas son usadas como entradas para la transformación de componentes principales.

La Técnica de Análisis Selectivo de Componentes Principales desarrollada por Chavez Jr. y Yaw Kwarteng (1989) se usa para realizar o mapear diferencias o contrastes entre diferentes regiones espectrales. Al usar únicamente dos bandas como entrada del análisis de componentes principales, la información que es común a ambas será mapeada en la primera componentes y la información que es única a una de las dos imágenes será mapeada en la segunda componente. Esto hace que tanto los tonos oscuros o brillantes de la imagen resultante puedan ser interpretados más fácilmente, porque solamente dos regiones espectrales están involucradas al mismo tiempo en el análisis (p.e. el visible contra el infrarrojo puede mostrar el contraste entre en la vegetación y los óxidos de hierro). La selección de los pares de bandas usadas para el análisis de componentes principales se basa en la matriz de correlación y/o en las características espectrales de los materiales específicos en cada una de las bandas de la imagen.

#### *Técnica de Crosta.*

La Técnica de Crosta también llamada Análisis de Componentes Principales Orientadas (ACPO) (Crosta y McM. Moore, 1989) permite la identificación de las componentes principales que contienen información espectral de materiales específicos, así como la contribución de cada una de las bandas originales relacionadas a la respuesta espectral teórica de los materiales buscados con base en el signo (positivo o negativo) y la magnitud de los vectores característicos. Esta técnica indica cuando dichos materiales se manifiestan en tonos oscuros (valores de brillantez bajos) o brillantes (valores de brillantez altos) en el despliegue de las imágenes de las componentes principales seleccionadas.

#### *Técnica de Análisis de Componentes Principales Dirigidas.*

La técnica de Análisis de Componentes Principales Dirigidas (ACPD) desarrollada por Frazer (1991), usa como bandas de entrada imágenes de cocientes de bandas porque estas compensan las variaciones causadas por la topografía y enfatizan el contenido de color de los datos a pesar de las variaciones en las condiciones de iluminación de la escena. Si el Análisis de Componentes Principales Estandarizado es aplicado al ACPD, (utilizando como entrada cocientes de bandas) se podrá separar las diferencias espectrales de los materiales de la superficie terrestre (p.e. óxidos de hierro de la vegetación) debido a que los vectores característicos resultantes son forzados a ser las diagonales de un cuadrado cuyos lados son definidos por las variables de entrada. Por ejemplo, si la varianza está dominada por la vegetación, el vector característico de PC1 deberá ser la diagonal que pase a través del cúmulo representativo de la vegetación en el dispersograma de las dos imágenes de entrada y el segundo vector característico será la diagonal que atravesase los cúmulos no representa-

tivos de la vegetación. De esta forma se determina por la dirección de los vectores característicos y en como éstos se relacionan a los diferentes materiales que componen la escena, si los tonos claros u oscuros en las imágenes de las componentes principales se refiere a un material en particular. Un punto crítico en esta técnica es la selección de los cocientes de bandas que sirven de entrada para el análisis. Además de que este método requiere que la escena que cubre la imagen sea dominada por óxidos de hierro y vegetación.

*Análisis de componentes principales dirigidas (ACPD) para la diferenciación de óxidos de hierro.*

La abundancia de óxidos de hierro (en su mayor parte como producto de alteración supergénica) en el área de estudio hace que la diferenciación y mapeo de especies de óxidos sea más significativo, porque las diferentes especies pueden ser relacionadas a diferentes procesos. Por ejemplo, la goethita se puede desarrollar en las zonas de oxidación de las mineralizaciones de sulfuros de hierro o por erosión, mientras que la hematita puede formarse a partir de la meteorización de muchas rocas o encontrarse como cementante en otras ocasionando la coloración roja en muchas de ellas.

Para poder extraer la información acerca de la distribución de óxidos de hierro (hematita y goethita) dentro del área de estudio fue necesario minimizar el efecto de la cobertura de la vegetación usando la técnica de Análisis de Componentes Principales Dirigidas (ACPD). Para la aplicación de esta técnica se obtuvieron los dispersogramas de cada una de las combinaciones de cocientes de banda de las bandas seleccionadas a partir de las características espectrales de la goethita, hematita y de la vegetación (Tabla 4).

El dispersograma de los cocientes de bandas  $TM3/TM1$  y  $TM4/TM3$  (figura 9) presenta características que indican que estos cocientes pueden ser uti-

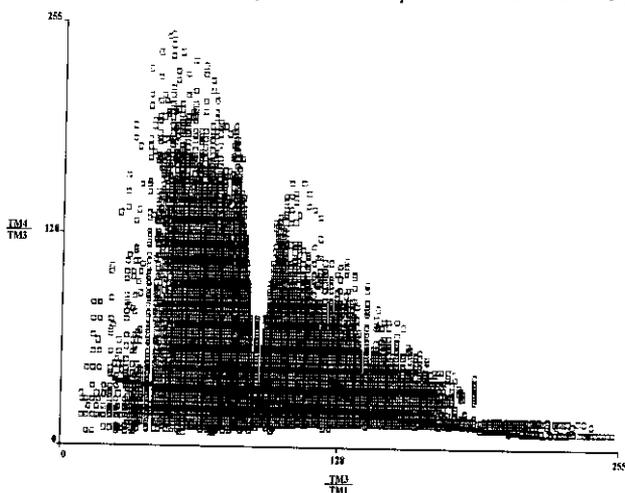


Fig. 9. Dispersograma del espacio  $TM3/TM1$  vs  $TM4/TM3$ .

lizados como entrada para el ACPD. El cociente TM4/TM3 mapea la vegetación en tonos brillantes debido a la alta reflectancia en la banda TM4 (Ver figura 5, Tabla 4) en contraste con la caída de la pendiente de reflectancia en la parte del visible (banda TM3) (ver figura 5, Tabla 4) debido a la absorción de la clorofila (Kaufmann, 1988). Las características espectrales tanto de la hematita como de la goethita (ver figura 4, Tabla 4) hacen que la primera sea mapeada en tonos oscuros en el cociente TM3/TM1, mientras que la goethita sea mapeada en tonos brillantes en el mismo cociente.

Debido a la forma en que son mapeados los óxidos de fierro y la vegetación por los cocientes usados en ACPD, el dispersograma de estos cocientes presentará valores bajos en el eje de las abcisas (TM3/TM1) y altos en el eje de las coordenadas (TM4/TM3) para la vegetación y moderados en ambos ejes para los pixels con una mezcla de vegetación y otro material. La hematita muestra valores bajos en ambos ejes del dispersograma y la goethita de moderados a altos. Por lo tanto, un pixel que contenga hematita y goethita en el espacio formado por los cocientes TM3/TM1 contra TM4/TM3 será graficado sobre la línea hematita-goethita. Si el pixel contiene alguna cantidad de vegetación su posición se moverá fuera de la línea hematita-goethita en dirección de la vegetación. De esta manera la proyección de un pixel dentro de la línea hematita-goethita indicará la cantidad relativa de hematita y goethita contenida en el pixel.

Los coeficientes de correlación, valores característicos y vectores característicos del área de estudio para el Análisis de Componentes principales Dirigidos de los cocientes TM3/TM1 y TM4/TM3 se muestran en la Tabla 5.

**TABLA 5**  
**Matriz de correlación y de vectores característicos para los cocientes de banda TM3/TM1 y TM4/TM3 de la imagen Ceboruco.**

MATRIZ DE CORRELACIÓN		
COCIENTES DE BANDA	TM3/TM1	TM4/TM3
TM3/TM1	1,0	-20,91
TM4/TM3	-20,91	1,0
MATRIZ DE VALORES CARACTERÍSTICOS		
COMPONENTE	CPD1	CPD2
% DE VARIANZA	60,46	39,54
VALOR CARACTERÍSTICO	1,21	0,79
TM3/TM1	70,71	70,71
TM4/TM3	-70,71	70,71

De los valores característicos del ACPD (Tabla 5) se tiene que el 60.46% de la varianza es mapeado en la CPD1 y el restante 39.54% en la CPD2. Las

direcciones de los vectores característicos superpuestas sobre los campos de la hematita, goethita y vegetación son dibujadas en la figura 10.

De la figura 10 se puede inferir que la imagen CPD1 contendrá la información concerniente a los óxidos de fierro; la hematita se mapeará en tonos oscuros mientras que la goethita en tonos brillantes. La imagen CPD2 mapea las áreas con una alta densidad de vegetación en tonos brillantes y las áreas con una densidad baja en tonos oscuros.

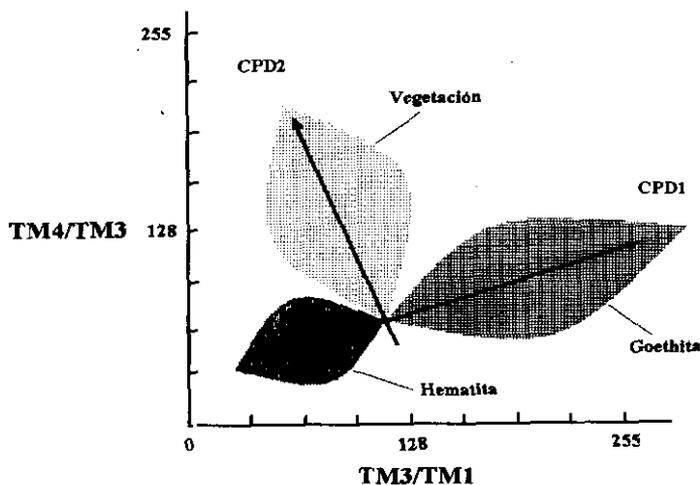


Fig. 10. Dirección de los vectores característicos de la imagen Ceboruco.

*Técnica de Crosta con seis y cuatro bandas para el mapeo de óxidos de fierro e hidroxilos.*

Para la Técnica de Crosta, se empleó una serie de análisis de componentes principales de seis y cuatro bandas para el mapeo de hidroxilos y óxidos de fierro sobre el área del Ceboruco.

*Técnica de Crosta con seis bandas para el mapeo de óxidos de fierro e hidroxilos.*

La Tabla 6 describe la transformación de componentes principales usando la matriz de covarianza de las bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7 de la imagen Ceboruco.

Del análisis del signo y magnitud de los vectores característicos de las componentes resultantes de las seis bandas de entrada se tiene que la componente principal 1 (CP1) no revela rasgos espectrales significativos, dado que está compuesta por una mezcla positiva de todas las bandas, en este caso con una contribución mayor de la banda TM5 (75,63%). Además de contener el 87,29% de la varianza. Por lo tanto representa únicamente información debido a la topografía y al albedo. La componente principal 2 (CP2) está dominada por la con-

**TABLA 6**  
**Transformación de Componentes Principales de seis bandas Landsat-TM de la imagen Ceboruco para el mapeo de concentraciones anómalas de óxidos e hidroxilos**

COMPONENTE	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
% VARIANZA	87,29	6,39	5,32	0,57	0,38	0,05
VALOR CARACTERÍSTICO	1.496,52	109,56	91,12	9,85	6,49	0,81
TM1	23,38	-11,34	-54,18	-24,83	71,20	-26,47
TM2	16,50	2,50	-30,98	-11,91	1,75	92,82
TM3	33,07	-1,86	-51,79	-27,32	-69,51	-25,31
TM4	24,19	92,64	- 8,20	25,91	7,25	-6,34
TM5	75,65	6,22	56,30	-32,01	6,32	1,28
TM7	42,15	-32,21	-13,52	82,45	1,15	-0,45

tribución de la banda TM4 (92,64%). Dado que la vegetación presenta una reflectancia alta en la banda TM4, los pixels con información acerca de la vegetación se presentan en tonos brillantes en esta componente. Los vectores característicos de la componente principal 3 (CP3) revelan que ésta es similar a la CP1, con una contribución balanceada en algunas bandas. Los vectores característicos de las componentes principales CP4, CP5 y CP6 revelan que éstas contienen información espectral relacionada con óxidos de hierro e hidroxilos.



Fig. 11. Imagen inversa de CP4 del Análisis de Componentes Principales (ACP) de las seis bandas no térmicas de la imagen Ceboruco. Las concentraciones anómalas de hidroxilos son representadas en tonos brillantes. (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.

Los hidroxilos son mapeados en tonos oscuros en la componente principal 4 (CP4) debido a la contribución positiva de 82,45% de la banda TM7 y a la contribución negativa de la banda TM5 (-32,01%). Para representar estos materiales en tonos brillantes se obtuvo la imagen inversa de CP4 (hidroxilos) (figura 11). Haciendo un análisis similar para la componente principal 5 (CP5) vemos que los pesos de los vector característico con una magnitud mayor, corresponden a la banda TM1 con el 71,20% seguido por el -69,51% correspondiente a la banda TM3. De acuerdo a las características espectrales de los óxidos de fierro (Tabla 4), estos serán mapeados en tonos oscuros en CP5. Para mapear los óxidos en tonos brillantes se obtuvo la imagen inversa de CP5 (Óxidos) (figura 12). Los vectores característicos para la componente principal 6 (CP6) son de 92,82% para la banda TM2, -25,31% para la banda TM3 y de -26,47 para la banda TM1, por lo tanto esta componente representa los óxidos (hematita) en tonos oscuros.



Fig. 12. Imagen inversa de CP5 del Análisis de Componentes Principales (ACP) de las seis bandas no térmicas de la imagen Ceboruco. Las concentraciones anómalas de óxidos de fierro son representadas en tonos brillantes. (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.

Resumiendo los resultados del análisis de las componentes principales de las seis bandas no térmicas de la imagen Ceboruco, podemos decir que los hidroxilos, óxidos de fierro así como la vegetación son mapeados en las imágenes de las componentes principales siguientes: los hidroxilos son oscuros en CP4, los óxidos de fierro son oscuros en CP5, la hematita es oscura en CP6 y la vegetación en tonos claros en la CP2. Para el mapeo de alteración se obtuvo la imagen inversa de la CP4 y CP5 para mostrar las concentraciones anó-

malas de hidroxilos y óxidos de fierro en tonos brillantes respectivamente, seguido de la suma de estas imágenes en la cual las concentraciones anómalas tanto de óxidos como hidroxilos se muestran en tonos brillantes (figura 13).



Fig. 13. Imagen H+O (hidroxilos mas óxidos). Las zonas con concentraciones anómalas de hidroxilos y óxidos son representados en tonos brillantes. (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.

*Técnica de Crosta con cuatro bandas para el mapeo de óxidos de fierro.*

Para el mapeo de óxidos de fierro se eligieron las bandas TM1, TM3 y TM5 de acuerdo a las características de reflectancia enunciadas en la Tabla 4, además de la banda TM4, porque esta es representativa de la vegetación. La banda TM7 puede ser usada en lugar de la banda TM5 con una pequeña diferencia en los resultados (Loughlin, 1991).

La Tabla 7 describe la transformación de componentes principales de las bandas 1, 3, 4, y 5 de la imagen Ceboruco. De la magnitud y signo (positivo o negativo) de los vectores característicos se tiene que la componente principal 1 (CP1) presenta vectores característicos positivos en todas las bandas. El valor característico (1196,86) de CP1 representa el 86,95% de la varianza de los datos por lo que puede ser interpretada como el efecto topográfico y el albedo de las imágenes originales. Los pesos de los vectores característicos de la componente principal 2 (CP2) indican que dicha componente está dominada por la vegetación debido al valor de 93,40% del vector característico de la banda TM4. El signo positivo indica que los pixels influenciados por la vegetación

aparecerán brillantes. La componente principal 3 (CP3) describe las diferencias entre las bandas del visible (TM1 y TM3) y las bandas del infrarrojo (TM4 y TM5). Los materiales con una alta reflectancia en la región del visible aparecerán en tonos brillantes en CP3 debido al signo positivo de los vectores característicos en TM1 y TM3 y aquellos que presentan una alta reflectancia en la región del infrarrojo aparecerán en tonos oscuros debido al signo negativo de los vectores característicos de las bandas TM4 y TM5.

**TABLA 7**

**Transformación de Componentes Principales de cuatro bandas Landsat-TM de la imagen Ceboruco para el mapeo de las concentraciones anómalas de óxidos**

COMPONENTE	CP1	CP2	CP3	CP4
% VARIANZA	86,95	6,98	5,59	0,47
VALOR CARACTERÍSTICO	1.196,86	96,04	77,01	6,52
TM1	25,36	-0,01	65,03	71,60
TM3	36,43	8,17	61,88	-69,11
TM4	28,43	93,40	-20,00	8,20
TM5	84,97	-34,75	-39,25	5,53



Fig. 14. Imagen de óxidos de hierro (O) resultante de la imagen inversa CP4 del ACP de cuatro bandas. Las concentraciones anómalas de óxidos son representadas por pixels brillantes. (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.

De los vectores característicos de la cuarta componente (CP4) se tiene que la contribución de TM4 y TM5 es mínima en comparación con los valores de los vectores característicos de las bandas TM1 y TM3 de 71,60% y -69,11% respectivamente. Las magnitudes de TM1 y TM3 son opuestas en signo por lo que se puede predecir que los óxidos con una alta reflectancia en TM3 y absorción en TM1 estarán representados en tonos oscuros debido al signo negativo en TM3 y al signo positivo en TM1. Para representar los óxidos de hierro en tonos brillantes se obtuvo la inversa de la CP4. La imagen (O) para mapear concentraciones anómalas de óxidos de hierro es reproducida en la figura 14.

*Técnica de Crosta con cuatro bandas para el mapeo de hidroxilos.*

La Tabla 8 describe la transformación de componentes principales de las bandas TM1, TM4, TM5 y TM7 de la imagen Ceboruco. Las bandas fueron seleccionadas a partir de las características enunciadas en la Tabla 4. Las bandas 2 y 3 son omitidas del análisis para evitar el mapeo de óxidos de hierro.

**TABLA 8**  
Análisis de Componentes Principales de cuatro bandas Landsat-TM de la imagen Ceboruco para el mapeo de concentraciones anómalas de hidroxilos

	CP1	CP2	CP3	CP4
%VARIANZA	88,22	7,43	3,76	0,59
VALOR CARACTERÍSTICO	1.298,50	109,41	55,32	8,64
TM1	24,16	-10,94	77,91	56,79
TM4	25,81	92,38	19,73	-20,25
TM5	82,01	-5,99	-48,25	34,79
TM7	44,99	-36,19	30,15	-73,85

Siguiendo el mismo procedimiento empleado para el mapeo de óxidos se puede decir que la CP1 muestra la información del albedo y la topografía debido a que todos los valores de los vectores característicos son positivos con un valor característico del 1298,50 que representa una varianza del 88,22%. La magnitud del vector característico de TM4 (92,38%) en la CP2 muestra que esta componente está dominada por la vegetación y el signo positivo nos indica que la vegetación es mapeada en tonos brillantes. La CP3 es similar a la CP1 en la que algunas de las bandas contribuyen en proporciones balanceadas. De los vectores característicos de TM5 y TM7 en la CP4 se tiene que los pixels influenciados por la presencia de hidroxilos se presentan en tonos brillantes debido al valor negativo y magnitud del vector característico en TM7 (absorción) (-73,85) y a la magnitud positiva de la banda TM5 (34,79%). La imagen (H) para el mapeo de las zonas anómalas de hidroxilos es reproducida en la figura 15.



Fig. 15. Imagen de hidroxilos (H) resultante del ACP de cuatro bandas. Las concentraciones anómalas de hidroxilos son representadas por pixels brillantes. (A) Sierra El Guamu-chil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ce-boruco.



Fig. 16. Imagen (H+O) resultante de la suma de las imágenes O y H del ACP de cuatro bandas. Las concentraciones anómalas de óxidos e hidroxilos son representadas por pixels brillantes. (A) Sierra El Guamu-chil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ce-boruco.

Las imágenes monocromáticas de las concentraciones anómalas de óxidos de hierro e hidroxilos producidas por el Análisis de Componentes principales de cuatro bandas (figuras 14 y 15) son fáciles de interpretar porque en estas imágenes dichas concentraciones son representadas por pixels brillantes. Sin embargo, las imágenes a color son más útiles para el propósito de discriminar los materiales presentes en el terreno.

Para el mapeo de alteración se sumaron las imágenes de óxidos e hidroxilos para producir la imagen O+H en la que los pixels con concentraciones anómalas de óxidos e hidroxilos están representadas por tonos brillantes (figura 16).

#### *Realce espacial para el mapeo de lineamientos.*

Las imágenes Landsat-TM y los productos del procesamiento de las mismas son usadas frecuentemente para el mapeo de estructuras geológicas regionales en muchos estudios de exploración minera, porque estas estructuras son esencialmente «bordes» físicos. Las fracturas y fallas en las rocas comúnmente se presentan como bordes o segmentos de líneas que forman «lineamiento» en las imágenes de satélite. O'Leary y colaboradores (1976), definen un lineamiento como «un rasgo mapeable, simple o compuesto, cuyas partes son alineadas con una relación rectilínea o fuertemente curvilínea que difiere distintivamente de los patrones de los rasgos adyacentes y que presumiblemente reflejan un fenómeno del subsuelo». Estos lineamientos pueden ser formados por una variedad de elementos del paisaje, incluyendo la topografía, drenaje, vegetación y alineamientos de tonos del suelo. Algunos de estos lineamientos son continuos y muchos otros parecen ser continuos debido a que los espacios entre los bordes y segmentos de líneas es muy pequeño y son mezclados por el ojo humano. Sin embargo, numerosos análisis de imágenes muestran que casi todos los lineamientos son discontinuos.

El tamaño, localización y orientación de los lineamientos son las características a ser extraídas por el filtrado espacial de la imagen Ceboruco usando el método desarrollado por Moore y Waltz (1983) y los siguientes criterios: 1) los lineamientos pueden ser oscuros, brillantes o alineaciones sutiles de color gris en un fondo más oscuro; 2) los lineamientos menores de 1 cm no pueden ser mapeados y 3) los segmentos de líneas con una separación menor a 0,5 cm. se pueden unir para formar lineamientos continuos.

El método de Moore y Waltz es un procedimiento de 5 pasos para el realce de lineamientos sobre datos Landsat. Los cinco pasos son:

- 1) Generar una imagen pasa-bajas. Debido a que cuando una imagen que contiene altas frecuencias (ruido) es empleada en el paso (2), los segmentos de líneas resultantes son numerosos, delgados y relativamente cortos.

- 2) Uso de algoritmos de convolución para derivar componentes direccionales. En este paso se incrementa el contraste de los bordes y de los segmentos de líneas que tienen una tendencia en la dirección deseada.

- 3) Suavizar la imagen de componente direccional del paso (2) con un fil-

trado pasa-bajas, para reducir el efecto secundario (artefactos, armónicos y ruido) de la convolución direccional.

4) Extraer los segmentos de líneas y bordes prominentes. La distribución de los valores de brillantez de la imagen suavizada del paso (3) es primero reescalada dentro del rango de 0 a 255. Se aplica una modificación de contraste por saturación con un porcentaje de saturación de acuerdo al tamaño de los lineamientos que se quieran realzar.

5) Sumar la componente direccional del paso (4) a la imagen original, reescalado la suma dentro del rango de 0 a 255.

El filtrado espacial se realizó por medio de procesos de convolución con ventanas de 33. El proceso empleado se seleccionó de acuerdo al tiempo de cómputo empleado por los procesos disponibles y al tamaño de la imagen, en tanto que el tamaño de la ventana a la resolución del sensor en relación a la topografía y a la complejidad del terreno. La imagen seleccionada para llevar a cabo el filtrado espacial fue la componente principal 1 (CP1) resultante del ACP de las seis bandas no térmicas de la imagen Ceboruco, porque esta contiene el 87,29% del total de la varianza y esta compuesta por una mezcla positiva de todas las bandas, por lo que representa la información concerniente a la topografía y el albedo.

Para generar las imágenes de los pasos (1) y (3) se empleó un filtrado por medio de la mediana. Una comparación cualitativa de las imágenes filtradas por medio de la media y la mediana muestra que hay ligeras diferencias entre las dos. La imagen filtrada por medio de la mediana es ligeramente más marcada y contiene más detalles finos que la imagen filtrada por medio de la media. Las seis ventanas utilizadas en el paso (2) para enfatizar las diferencias direccionales y no direccionales de los valores de brillantez se muestran en la Tabla 9.

TABLA 9

Ventanas utilizadas en este estudio para enfatizar las diferencias direccionales y no direccionales de los valores de brillantez de la imagen Ceboruco

$$(1) \quad L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2) \quad L_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & -5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(3) \quad NE = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4) \quad NW = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$(5) \quad SW = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6) \quad SE = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Las ventanas 1 y 2 son filtros Laplacianos de realce no direccional. La ventana 1 reduce a cero los valores de los pixels excepto aquellos asociados a bordes en los datos; la ventana 2 es un Laplaciano re-aplicado a la imagen original que conserva la semblanza de los valores originales de los datos pero con información espacial adicional de los bordes.

Las ventanas 3, 4, 5 y 6 son filtros direccionales de Prewitt. Las direcciones de filtrado se seleccionaron con base en los patrones de fallamiento reportados para el área y en las observaciones de campo. Las ventanas 3 y 4 producen el valor máximo de salida para los cambios de valores de brillantez diagonales de arriba hacia abajo en dirección NW y NE en tanto que las ventanas 5 y 6 de abajo hacia arriba para extraer los lineamientos en dirección SE y SW.



Fig. 17. Realce espacial Laplaciano (ventana 1) de la primera componente (CP1) de las bandas reflectivas de la imagen Ceboruco, donde se muestra el patrón dendrítico presente en el área.

La figura 17 muestra el filtrado Laplaciano de la componente principal 1 (CP1) de las seis bandas reflectivas de la imagen Ceboruco por medio de la ventana 1. En esta imagen se puede observar el fino patrón dendrítico de la Sierra Madre Occidental y de la Sierra El Guamuchil, como también los derrames basálticos pertenecientes al Volcán Ceboruco, conos cineríticos y domos volcánicos que se alinean en dirección NW. En la cima del Volcán Ceboruco se puede observar dos estructuras circulares las cuales son asociadas a las calde-

ras que se formaron en las diferentes etapas eruptivas del volcán. Hacia la parte sur del área se observa un fuerte lineamiento curvilíneo que se ha identificado como la falla del Río Ameca y una estructura circular hacia el extremo oeste de dicha estructura.



Fig. 18. Realce espacial Laplaciano (ventana 2) de la primera componente (CP1) de las bandas reflectivas de la imagen Ceboruco, donde se muestran las zonas estructurales obtenidas del análisis de lineamientos y su correlación con el modelo propuesto por Ferrari *et al.* (1993). (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental, (C) Volcán Ceboruco y (D) Depresión de Amatlán de Cañas.

La imagen de la CPI filtrada por medio del Laplaciano de la ventana 2 (figura 18) muestra también el patrón dendrítico, aunque si bien este no es tan acentuado como en la figura 17. En lo que se refiere a la falla del Río Ameca, las calderas del Volcán Ceboruco, así como los derrames basálticos asociados a dicho volcán; estos se muestran de manera muy clara en la imagen. Otra estructura que se puede observar es el rasgo circular que se presenta en el área de El Pilón así como el cruce de lineamientos en la parte superior de dicha estructura; hacia la parte NE de la misma área de El Pilón se observan rasgos circulares concéntricos. También se puede observar la estructura circular de la figura 17 en el extremo SW de la falla del Río Ameca. Otro rasgo muy evidente es una estructura rectangular formada por el cruce de lineamientos a 90° que limita la Sierra Madre Occidental en el área de Jala. Una característica importante de la imagen filtrada de la figura 18 es la buena calidad visual que pre-

senta, lo que hace que esta sea más apropiada para la interpretación visual que la imagen de la figura 17.



Fig. 19. Realce espacial en dirección NW-SE obtenido a partir de la suma de los filtrados en dirección NW y SE de la primera componente (CP1) de las bandas reflectivas de la imagen Ceboruco y zonas estructurales obtenidas del análisis de lineamientos y su correlación con el modelo propuesto por Ferrarí *et al.* (1993). (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental, (C) Volcán Ceboruco y (D) Depresión de Amatlán de Cañas.

La figura 19 muestra el filtrado en dirección NW-SE que se obtuvo a partir de la suma de las imágenes filtradas en dirección NW y SE (ventanas 4 y 6 respectivamente) y la figura 20 el filtrado en dirección NE-SW de la suma de las ventanas 3 y 5 dirección NE y SW respectivamente. Del análisis de estas imágenes se han reconocidos dos patrones principales de estructuras uno en dirección NW-SE que presenta una serie de lineamientos de magnitud considerable los cuales son más claros en la Sierra Madre Occidental y Sierra El Guamuchil. El segundo con dirección NE-SW que corta casi de forma perpendicular a los orientados en dirección NW-SE formando un sistema de fracturamiento en bloques en forma de enrejado. Estas direcciones del patrón estructural limitan la depresión sobre la cual se depositaron las lavas basálticas del Eje Neovolcánico formando una estructura de graben, por lo que se tienen lineamientos muy extensos (como los que se pueden observar en la parte NE de ambas imágenes) que limitan los afloramientos de los materiales basálticos



Fig. 20. Realce espacial en dirección NE-SW obtenido a partir de la suma de los filtrados en dirección NE y SW de la primera componente (CP1) de las bandas reflectivas de la imagen Ceboruco y zonas estructurales obtenidas del análisis de lineamientos y su correlación con el modelo propuesto por Ferrari *et al.* (1993). (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental, (C) Volcán Ceboruco y (D) Depresión de Amatlán de Cañas.

de el Volcán Ceboruco. De la interpretación visual de las imágenes de las figuras 19 y 20 se puede inferir que la Sierra El Guamuchil constituye un horst con dos grábenes al norte y al sur. El horst que forma la Sierra El Guamuchil está limitado al sur por el lineamiento correspondiente a la falla del Río Ameca y al norte por los rellenos de lava basáltica, en tanto que el graben se encuentra limitado en su parte norte por la Sierra Madre Occidental y al sur por la Sierra El Guamuchil como se muestra en la figura 3. A nivel local en el área de El Pílon y el Molinete el patrón predominante es el NE-SW y en área de Jala-Jomulco y Rosa Blanca el NW-SE.

## REFERENCIAS

- CLARK, K. F.; DOE, R. R., y KNOWLING, R. D. (1979): «Fissure Vein Deposits Related to Volcanic and Subvolcanic Terranes in Sierra Madre Occidental Province», México, *Nevada Bur. Mines Rept.* 33, pp. 189-202.
- CRÓSTA, A. P., y MCM MOORE, J. (1989): «Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery

- for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain: Proceedings of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology», Calgary, Alberta, Canadá, Oct. 2-6, pp. 1173-1187.
- CHAVEZ, P. S. JR., y YAW KWARTENG, A. (1989): «Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing», Vol. 55, No. 3, pp. 339-348.
- DELGADO, A. L. A.; GASTELUM, F. A., y OROZCO, F. M. J. (1978): «Aplicaciones de Imágenes de Satélite Landsat I en la Interpretación de Lineamientos y Tectónica del Estado de Nayarit: VII Seminario Interno Sobre Exploración Geológico-Minera», Consejo de Recursos Minerales, pp. 537-563.
- DEMANT, A. (1978): «Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación». *Rev. Inst. de Geología*, Universidad Nacional Autónoma de México, Vol. 2, No. 2, pp.
- FRASER, S. J. (1991): «Discrimination and Identification of Ferric Oxides Using Satellite Thematic Mapper Data: A Newman Case Study». *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 12, No. 3, pp. 635-641.
- FERRARI, L.; PASQUARÉ, G.; VENEGAS, S.; CASTILLO, D., y ROMERO, F. (1993): «Estudio Geológico Estructural del Área Ceboruco-San Pedro y Tectónica Regional del Sector Noroccidental del Rift de Tepic: Geotermia». *Rev. Mexicana de Geoenergía*, Vol. 9, No. 1, pp. 93-116.
- GOETZ, A. F., y ROCK, B. N. (1983): «Remote Sensing for Exploration: An Overview». *Economic Geology*, Vol. 78, No. 4, pp. 573-590.
- GUNN, B. M., y MOOSER, F. (1970): «Geochemistry of the Volcanics of Central Mexico». *Bulletin Volcanologique*, Vol. 34, pp. 557-616.
- HUNT, G. R., y ASHEY, R. P. (1979): «Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared». *Economic Geology*, Vol. 74, pp. 1613-1629.
- HUNT, G. R. (1977): «Spectra Signatures of Particulate Minerals in the Visible and Near Infrared». *Geophysics*, Vol. 42, No. 3, pp. 501-513.
- (1979): «Near-Infrared (1.3-2.4 m) Spectral of Alteration Minerals Potential for Use in Remote Sensing». *Geophysics*, Vol. 44, No. 2, pp. 1974-1986.
- KAUFMANN, H. (1988): «Mineral Exploration along the Aqaba-Levant Structure by use of TM-data: Concepts, processing and results». *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 9, Nos. 10 y 11, pp. 1639-1658.
- LOUGHLIN, W. P. (1991): «Principal Component Analysis for Alteration Mapping». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 57, No. 9, pp. 1163-1169.
- MOORE, G. K., y WALTZ, F. A. (1983): «Objective Procedure for Lineaments Enhancement and Extraction». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 79, No. 5, pp. 641-647.
- ROMERO RÍOS, F.; SAUCEDO GIRÓN, R., y CORTÉS CORTÉS, A. (1991): «Estudio Geológico Regional del Graben de Tepic-Ixtlán, Nayarit». Informe 04/91 Comisión Federal de Electricidad.
- SALAS, C. P. (1975): «Cartas y Provincias Metalogénicas de la República Mexicana». Pub. Consejo de Recursos Minerales, No. 21 E, 242 pp.
- SATTERWHITE & HENLEY & CORNEY (1985): «Effects of Lichenson the Reflectance Spectra of Granitic Rock Surface». *Remote Sensing of Environment*, Vol. 18, 105-112.
- SINGH, A., y HARRISON, A. (1985): «Standardized Principal Components». *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 6, No. 6, pp. 883-896.
- WISSER, E. (1966): «The Epithermal Precious Metal Province of Northwest Mexico». *Nevada Bur. Mines Rept.*, 13, pt. C. pp. 63-92.

