



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DETECCION DE ALTERACION HIDROTHERMAL  
Y REALCE ESTRUCTURAL USANDO IMAGENES  
LANDSAT THEMATIC MAPPER. SU APLICACION  
EN LA EXPLORACION MINERA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOFISICO  
P R E S E N T A  
JUAN RAMON RUIZ ARMENTA**



MEXICO, D. F.

1994

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-003

SR. JUAN RAMON RUIZ ARMENTA  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Rosa María Prol Ladesma, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geofísico:

**DETECCION DE ALTERACION HIDROTHERMAL Y REALCE ESTRUCTURAL USANDO  
IMAGENES LANDSAT THEMATIC MAPPER. SU APLICACION EN LA EXPLORACION  
MINERA**

	<b>INTRODUCCION</b>
<b>I</b>	<b>LA INDUSTRIA MINERA EN MEXICO</b>
<b>II</b>	<b>YACIMIENTOS MINERALES</b>
<b>III</b>	<b>AMBIENTE TECTONICO Y MINERALIZACION</b>
<b>IV</b>	<b>CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCION REMOTA</b>
<b>V</b>	<b>PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES</b>
<b>VI</b>	<b>AREA DE ESTUDIO</b>
<b>VII</b>	<b>PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO</b>
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

A t e n t a m e n t e  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 26 de enero de 1994  
EL DIRECTOR

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\*EGLM\*gggt\*

3/1

DETECCIÓN DE ALTERACIÓN HIDROTÉRMICA Y REALCE  
ESTRUCTURAL USANDO IMÁGENES LANDSAT THEMATIC  
MAPPER. SU APLICACIÓN EN LA EXPLORACIÓN MINERA.

JUAN RAMÓN RUIZ ARMENTA

◆ ◆

***En Memoria***

***De mi madre Doña Josefina  
Armenta de Ruiz y de mi  
hermana Lic. Rosa Natalia  
Ruiz Armenta como un  
tributo a su amor cuyo  
espíritu sobrevivirá por  
siempre en la memoria de  
todos nosotros.***

◆ ◆

◆ ◆

***Con admiración y cariño...***

***A mi padre Don Norberto  
Ruiz Katt por su ejemplo de  
lucha y perseverancia.***

◆ ◆

◆ ◆

**Con respeto...**

**A la Lic. Luz Alicia Iturbe de  
Garay comprometida  
consigo misma en la  
búsqueda continua de la  
excelencia en las diferentes  
etapas y actividades de su  
vida.**

◆ ◆

◆ ◆

**y con esperanza...**

**A mis hermanos Guadalupe,  
Martha Julieta, Norberto,  
Pedro, Silvia Josefina y  
José Enrique para que con  
decisión y unidos afronten  
los retos que les permitan  
sentirse satisfechos en la  
vida.**

◆ ◆

◆ ◆

*Si cada quien,  
con su convicción más profunda  
y su ideal puesto sobre la cabeza  
trazara sus caminos;  
las torcidas veredas del pensamiento  
quedarían en la lejanía, bajo el polvo de los  
inexorables  
pies resueltos...*

◆ ◆

*J.R.R.Á*

## AGRADECIMIENTOS

Hago patente mi más profunda gratitud a la Dra. Rosa María Prol Ledesma que ha dedicado su tiempo y capacidad a la dirección, lectura y discusión del presente trabajo.

Al Dr. Román Álvarez Bejar, Dr. Valentino Sorani Dal Bon, Dra. Leticia Flores Marquéz, Geógrafo Roberto Bonifaz, Ing. Carlos Garza y al Dr. Mario Ruiz Castellanos por sus comentarios y sugerencias así como por la revisión del manuscrito.

También agradezco los esfuerzos de todas y cada una de las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización del presente trabajo. En especial a mi amigo F. J. Sainz Hernández quien frecuentemente me han brindado su apoyo en momentos y condiciones difíciles.

Finalmente, quisiera dar las gracias al Centro Científico IBM de México y al Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática por proveer parte del software usado en este trabajo y a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (UNAM) por su apoyo a través de los proyectos de investigación para exploración de sistemas hidrotermales IN-101992 y IN-101694.

*rbm*

# CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
I. LA INDUSTRIA MINERA EN MÉXICO	1
I.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	1
I.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA INDUSTRIA MINERA	3
I.3 PERSPECTIVAS DE LA INDUSTRIA MINERA EN MÉXICO	4
II. YACIMIENTOS MINERALES	5
II.1 TIPOS DE YACIMIENTOS MINERALES	5
II.2 CONTROLES ESTRUCTURALES	6
II.3 CLASIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS MINERALES	6
III. AMBIENTE TECTÓNICO Y MINERALIZACIÓN	9
III.1 PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS	9
III.2 AMBIENTE TECTÓNICO COMO UN CONTROL DE LA MINERALIZACIÓN	9
III.3 TECTÓNICA DE PLACAS Y YACIMIENTOS MINERALES	10
III.4 YACIMIENTOS MINERALES RELACIONADOS CON AMBIENTES DE SUBDUCCIÓN	11
III.4.1 Arcos volcánicos magmáticos	12
III.5 ARCOS MAGMÁTICOS Y YACIMIENTOS MINERALES RELACIONADOS AL AMBIENTE DE SUBDUCCIÓN EN MÉXICO	15
III.5.1 Regímenes magmáticos	15
III.5.2 Subducción y migración de magmas	17
III.5.3 Aspectos tectónicos	18
III.5.4 Mineralización relacionada a la migración del arco volcánico en México	19

<b>IV. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA</b>	<b>22</b>
IV.1 INTRODUCCIÓN	22
IV.2 TIPOS DE DATOS OBTENIDOS POR MEDIO DE PERCEPCIÓN REMOTA	22
IV.3 FUENTES DE ENERGÍA Y PRINCIPIOS DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	23
IV.3.1 Modelo ondulatorio de Maxwell	23
IV.3.2 Teoría Cuántica de Planck	24
IV.3.3 Generación de la radiación electromagnética	25
IV.4 INTERACCIÓN DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA CON LA ATMÓSFERA Y LA MATERIA	27
IV.4.1 Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera	27
IV.4.2 Interacción de la radiación electromagnética con la materia a nivel atómico	29
IV.4.3 Interacción de la radiación electromagnética con la materia a nivel macroscópico	29
IV.4.4 Interacción de la radiación electromagnética con suelos, rocas y vegetación	31
IV.4.4.1 Interacción con rocas y minerales	31
IV.4.4.2 Interacción con la vegetación	37
IV.4.5 Firmas espectrales o patrones de respuesta espectral	38
IV.5 ADQUISICIÓN DE DATOS DE PERCEPCIÓN REMOTA	38
IV.5.1 Características de las imágenes digitales de los sistemas de percepción remota	39
IV.5.2 Los sistemas de sensores remotos Landsat	41
IV.5.2.1 Características de los sistemas de sensores remotos a bordo de los Landsat 1, 2 y 3	42
IV.5.2.2 Características de los sistemas de sensores remotos a bordo de los Landsat 4 y 5	45
IV.6 FORMATO DE LAS IMÁGENES DIGITALES DE LOS SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA	49
<b>V. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES</b>	<b>52</b>
V.1 INTRODUCCIÓN	52
V.2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	53
V.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	54
V.4 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	56
V.4.1 Análisis estadístico	57
V.4.2 Histogramas	59
V.4.3 Preprocesamiento	60
V.4.4 Realce digital	63
V.4.4.1 Manipulación de contraste	64

V.4.4.2 Manipulación de rasgos espaciales	68
V.4.4.3 Manipulación de imágenes multiespectrales	77
<b>VI. ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>92</b>
VI.1 INTRODUCCIÓN	92
VI.2 ÁREA DE ESTUDIO	92
VI.2.1 Localización, vías de acceso y clima	92
VI.2.2 Ambiente geológico	93
VI.2.3 Geología local	94
VI.2.4 Ambiente tectónico	96
VI.2.5 Tectónica local	97
VI.2.6 Alteración hidrotermal	98
VI.2.7 Mineralización	99
VI.3 CRITERIOS DE EXPLORACIÓN	100
<b>VII. PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORÚCO</b>	<b>101</b>
VII.1 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO	101
VII.1.1 Análisis estadístico	101
VII.1.2 Preprocesamiento	103
VII.1.3 Realce digital	103
VII.1.3.1 Realce espectral para el mapeo de alteración hidrotermal	104
VII.1.3.2 Realce espacial para el mapeo de lineamientos	128
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>135</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>138</b>
<b>APENDICE A</b>	<b>143</b>

## RESUMEN

La imagen multispectral Thematic Mapper (TM) que cubre el área del Ceboruco, Nayarit México obtenida por el Landsat-5 en abril de 1991, fue procesada digitalmente para mapear zonas de alteración hidrotermal y lineamientos, con el objetivo de delinear áreas con mayor potencial minero dentro del área.

El procesamiento digital incluye: composiciones en color, análisis de componentes principales, filtrado direccional y filtros Laplaciano.

El área del Ceboruco se localiza dentro de una secuencia de rocas volcánicas compuesta principalmente por ignimbritas y andesitas que varían en edad desde el Terciario al Reciente. Estructuralmente, el área esta afectada por dos patrones de fallamiento con direcciones NW-SE y NE-SW, que actúan como un sistema de fallas conjugadas que forman estructuras tensionales (grabenes o cuencas). Las rocas volcánicas de la parte S-SE (Sierra El Guamuchil) y N-NE (Jala-Jomulco y Rosa Blanca-Los Aguajes) del área presentan alteración hidrotermal y supergénica (oxidación).

La información de alteración y lineamientos extraída de la imagen TM fue combinada para identificar y delinear las áreas con mayor posibilidades de contener yacimientos minerales. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el uso conjunto de las técnicas de procesamiento digital y de imágenes TM son un medio rápido y efectivo para la identificación de zonas de mayor potencial minero, con el consecuente ahorro de tiempo y de recursos económicos y humanos.

## INTRODUCCIÓN

Los recursos minerales de nuestro país no sólo son abundantes sino diversos. Existen minas en aproximadamente 300 municipios con una producción valuada en tres billones de dólares, situando a México entre los ocho primeros países del mundo en la producción de 16 diferentes minerales. Todo lo anterior debe inducir a que fomentemos nuestra minería y a que realicemos exploraciones que aumenten las reservas mineras del país.

Actualmente, con el desarrollo de la tecnología espacial, el avance en la computación y la conjunción de varias disciplinas (geociencias, análisis estadístico y procesamiento digital de imágenes) surge la *Percepción Remota* como una nueva herramienta en la exploración de los recursos naturales.

La Percepción Remota se distingue de los otros métodos de obtención de información sobre los recursos naturales, porque el dispositivo con el que se obtiene dicha información no se encuentra en contacto físico con el fenómeno, área u objeto de estudio (Colwell, 1984). La percepción remota utiliza los cambios en la cantidad y propiedades de la radiación electromagnética que interactúa con los objetos que componen la superficie terrestre para su estudio. Dichos cambios son detectados por sensores montados en aviones y/o satélites.

Otros tipos de medios diferentes a la radiación electromagnética pueden ser utilizados en la adquisición de datos sobre los recursos naturales sin estar en contacto directo con ellos, tal es el caso de los métodos geofísicos (gravimétricos, radiométricos, magnético y sísmico), por lo que la percepción remota es incluida frecuentemente dentro de estos. Sin embargo, la Percepción Remota engloba únicamente los datos adquiridos por los sensores remotos como resultado de la medición de la energía electromagnética que interactúa con el fenómeno, área u objeto bajo estudio.

El desarrollo que ha tenido la percepción remota desde el lanzamiento el 23 de julio de 1972 del *ERTS-1* (ahora llamado *LANDSAT*), primer satélite para el estudio de los recursos naturales, se debe al continuo refinamiento en el conocimiento y uso de los datos obtenidos por los sensores, la capacidad de almacenamiento de los equipos de cómputo y el mejoramiento de los mismos para el manejo de imágenes digitales. Esto ha extendido el área de aplicación de la Percepción Remota a campos tales como la identificación de macrofronteras de vegetación, uso de suelos, predicción de cosechas, monitoreo del medio ambiente y estudios oceanográficos, entre otros.

En la exploración y estudio de los recursos naturales, los aportes de las imágenes de satélite *LANDSAT* son muchos, pero tal vez los más significativos sean: 1) proveen una vista sinóptica de grandes áreas de terreno bajo condiciones de iluminación prácticamente

## INTRODUCCIÓN

uniforme; 2) obtener mediciones repetitivas haciendo posible el monitoreo de cambios rápidos en el terreno; 3) ser multispectrales, es decir contener diferentes tipos de información sobre la misma escena en cada una de las bandas espectrales que componen la imagen y 4) tener un formato digital, lo que permite manipularlas matemáticamente. Cada imagen LANDSAT cubre una área de aproximadamente  $185 \times 185$  Km ( $34,225$  Km<sup>2</sup>) y pueden ser adquiridas por los usuarios en forma de transparencias, impresiones en papel fotográfico (blanco y negro y/o a color) o en cintas y discos para computadoras (formato digital). El formato digital hace posible el realce y extracción de la información espectral contenida en la imagen.

Las imágenes LANDSAT así como los mosaicos formados a partir de estas, permiten la elaboración de mapas litológicos y de lineamientos (mapas estructurales) y/o hacer correcciones a los ya existentes. Mapas estructurales a partir de análisis de imágenes LANDSAT han sido elaborados por diferentes países entre los que se encuentran los Estados Unidos de Norteamérica (Fischer, 1976; Rowan y Lathram, 1980), Bolivia (Brockmann, 1980), Finlandia (Mikkola, 1982) y la Comunidad de Estados Independientes antes U.R.S.S. (Shchegoly, 1979). En el caso de Bolivia los mapas de lineamientos obtenidos a partir del análisis de las imágenes LANDSAT mostraron la relación entre dichos lineamientos y los cinturones mineralizados de los Andes (Brockmann, 1980). Estos mapas son de gran utilidad en el desarrollo de los programas de exploración minera.

La utilización de las diferencias en la reflectancia de determinadas rocas y minerales, captadas en el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de las imágenes LANDSAT, ofrecen posibilidades en la exploración de yacimientos minerales de las bandas 5 ( $0.6-0.7$   $\mu\text{m}$ ), 6 ( $0.7-0.8$   $\mu\text{m}$ ) y 7 ( $0.8-1.1$   $\mu\text{m}$ ) del LANDSAT Multispectral Scanner (Mapeador Multiespectral) y de las bandas 3 ( $0.63-0.69$   $\mu\text{m}$ ), 4 ( $0.76-0.90$   $\mu\text{m}$ ), 5 ( $1.55-1.75$   $\mu\text{m}$ ) y 7 ( $2.08-2.35$   $\mu\text{m}$ ) del LANDSAT Thematic Mapper (Mapeador Temático).

El contraste de las medidas radiométricas entre las unidades de roca y los materiales de la superficie obtenidos con la banda 6 ( $10.40-12.50$   $\mu\text{m}$ ) del LANDSAT Thematic Mapper en el infrarrojo térmico, son usadas para la identificación de estructuras y litologías a partir de anomalías térmicas.

La información extraída de las imágenes LANDSAT permite de esta forma establecer zonas con la mayor probabilidad de contener yacimientos de minerales, reduciendo el universo de búsqueda y optimizando los recursos tanto económicos como humanos.

La interpretación de las imágenes LANDSAT constituye así una nueva herramienta en la exploración minera cuyo resultados pueden ser combinados y correlacionados con otro tipo de datos sean estos geológicos, geofísicos, topográficos, etc. a través de Sistemas Geográficos de Información (SGI) que lleven a la localización de nuevos yacimientos. Lo anterior no implica que la percepción remota sea la panacea de la exploración minera pero sí una nueva herramienta que actualmente está disponible para dicho fin.

Este trabajo pretende dar una metodología empleando técnicas de percepción remota que faciliten la exploración de grandes áreas con fines mineros.

## INTRODUCCIÓN

El trabajo se compone de siete capítulos y conclusiones. En el Capítulo I se describe un panorama general de los problemas y perspectivas de la industria minera en México, así como una descripción del estado actual de la misma. El Capítulo II explica lo referente a la clasificación, tipos y controles estructurales de los yacimientos minerales. La relación de los yacimientos minerales con los ambientes tectónicos, en especial los relacionados con arcos magmáticos, y la distribución de diferentes yacimientos en México se presentan en el Capítulo III. El Capítulo IV expone los conceptos y fundamentos de la percepción remota. Las técnicas de procesamiento digital de imágenes empleadas en el presente trabajo son descritas y explicadas en el Capítulo V. La ubicación, vías de acceso, clima, ambiente tectónico, geología regional y local, mineralización, alteración hidrotermal y método de exploración son descritos en el Capítulo VI. Los resultados de la aplicación de las técnicas de procesamiento digital son presentados y explicados en el Capítulo VII. Finalmente, se formulan las conclusiones y recomendaciones acerca de las técnicas empleadas y los resultados obtenidos.

## CAPITULO I

# LA INDUSTRIA MINERA EN MÉXICO

### I.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

La minería en México de manera estricta se manifiesta hasta el Período Posclásico entre los años 900 a 1519 d.c.. Sin embargo, los primeros trabajos de orfebrería en oro datan de finales del Período Clásico (800 d.c.) de Monte Albán, Oaxaca (Ordoñez, 1986). Entre los minerales utilizados por el hombre prehispánico, además del oro, se encuentran la plata, cobre, estaño, calcita, azufre y algunos óxidos metálicos (Pérez Muñóz, 1986). Con la llegada de los españoles la extracción de metales preciosos se hizo sistemática, instalándose en Veracruz la primera fundidora para el tratamiento de hierro en el año 1519. En los años subsiguientes la actividad minera se extendió a Taxco (1521), Sultepec y Pachuca en 1524 para la extracción de plata y a Talpujahuá en 1525 para la extracción de oro. A finales de la época colonial la minería aportaba el setenta por ciento de las ventas al exterior, lo que le dio a México renombre mundial en lo que a producción de metales preciosos se refiere (Ordoñez, 1986).

Durante el siglo XIX la minería se concentró principalmente en la extracción de metales preciosos. En la primera mitad del siglo XX se dejó de explotar en forma exclusiva los metales preciosos dando paso a la explotación de los minerales industriales a causa de las guerras mundiales. También durante estos años fueron creadas dos agencias del Gobierno Federal para ayudar en el desarrollo y explotación de los recursos mineros del país: la *Comisión de Fomento Minero* en 1934 y el *Instituto Nacional para la Investigación de los Recursos Minerales* en 1949, renombrado en 1975 *Consejo de Recursos Minerales*.

Hoy la actividad minera del país ha sido valuada en más de 3 billones de dólares representando el 1.4% del Producto Interno Bruto (PIB). En los últimos cinco años el promedio de crecimiento anual ha sido bajo (1.1%) y menor al promedio total de crecimiento del 2.8% de la economía. Aproximadamente el 50% de la producción de la industria minero-metalúrgica es exportada y el 35% es importada. Los minerales metálicos representan el 60% del total de la producción minera y el 40% restante los minerales no metálicos. El porcentaje de los metales preciosos ha disminuido dentro del grupo de minerales metálicos y en lo que se refiere los a minerales no metálicos se han presentado disminuciones en el porcentaje de los minerales que se exportan.

En México se extraen alrededor de 45 diferentes minerales. Sin embargo, el 95% de la producción minera corresponde a unos cuantos de ellos (figura I.1). El 80% de las exportaciones e importaciones se concentran en 8 y 10 minerales respectivamente (figura I.2). Existen minas en 300 municipios dando empleo alrededor de 200,000 personas. Los principales estados productores de minerales metálicos son: Chihuahua, Coahuila,

## LA INDUSTRIA MINERA EN MÉXICO

Guanajuato, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas. Minerales arcillosos y arena se localizan en los estados de Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Tlaxcala, Puebla, Nuevo León y el Estado de México. Colocando a México entre los primeros ocho países del mundo en la producción de 16 diferentes minerales.

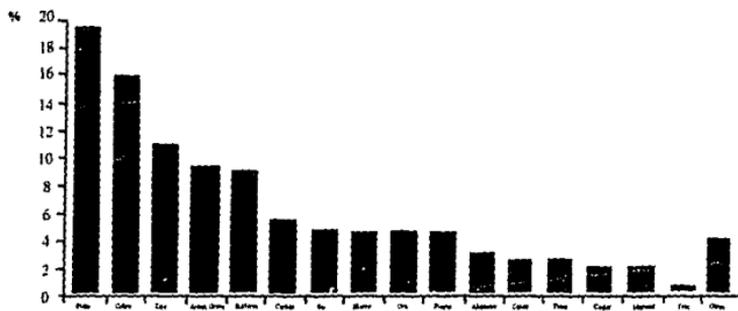


Figura 1.1 Producción promedio de minerales en México (1982-1991). Fuente: Departamento de Investigaciones Económicas, Banamex. Basado en datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y compañías del sector.

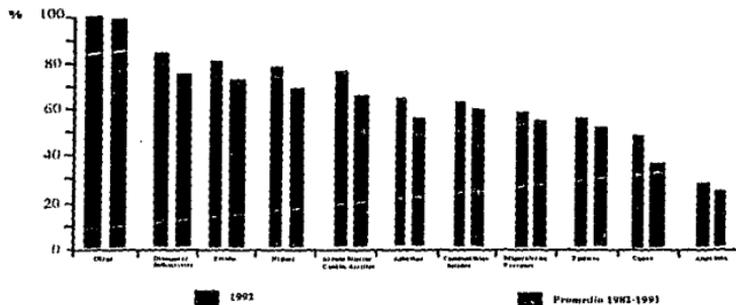


Figura 1.2 Porcentajes acumulativo de minerales de importación. Fuente: Departamento de Investigaciones Económicas, Banamex. Basado en datos del Banco de México

Las grandes compañías mineras cuentan con plantas de procesamiento, fundición y/o refinamiento y explotan la mayoría de las minas de carbón, hierro, metales no ferrosos y algunos minerales no metálicos. En tanto, las medianas y pequeñas compañías mineras (que representan las dos terceras partes de la industria minera del país) rara vez cuentan con plantas de procesamiento, lo que trae como consecuencia que la capacidad de refinamiento de la industria minera sea insuficiente. Únicamente el 80% de la plata, 60% del zinc, 60% del oro, 40% del cobre entre otros es refinado en México, la producción restante es exportada en forma de concentrados u otra presentación.

### 1.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA INDUSTRIA MINERA

La minería es una actividad de alto riesgo<sup>1</sup> sujeta a los siguientes factores:<sup>2</sup>

#### *Marco Jurídico*

La Ley Minera anterior ha sido modificada para asegurar las inversiones en el sector, dado que esta es una actividad de alto riesgo, canalizar inversiones para expandir las áreas, límites, concesiones mineras y periodos de concesión, simplificar los trámites administrativos y alentar la inversión extranjera y formalizar e integrar la cartografía minera y facilitar la transferencia de concesiones mineras entre particulares, así como entre el Consejo de Recursos Minerales y particulares.

#### *Mercado Internacional*

La oferta y la demanda de minerales depende fundamentalmente de la actividad económica en todo el mundo y de las inversiones productivas. Ambos factores determinan los niveles en el precio internacional de los minerales y fijan el crecimiento del sector.

#### *Factores Tecnológicos*

a) *Automatización.*- El uso de nuevas tecnologías que disminuyan los costos de producción, incrementen la oferta y que contribuyan en conjunto al descenso de los precios de producción. Dentro de este renglón la tendencia internacional es hacer innovaciones dentro de los sistemas mineros principalmente en automatización, robótica<sup>3</sup>, métodos de exploración más eficientes e inteligencia artificial para la toma de decisiones y control de maquinaria a través de sistemas computarizados.

b) *Desarrollo Tecnológico.*- Los avances tecnológicos en el campo de la computación, las comunicaciones, la robótica y los transportes (terrestre y espacial), así

<sup>1</sup> De cada peso que se invierte en la minería, sólo se recupera el 5% del capital invertido (Pérez Muñoz, 1986).

<sup>2</sup> Ley Minera. Publicada en el Diario Oficial del 26 de junio de 1992.

<sup>3</sup> Tecnología que involucra el diseño, construcción y operación de robots para la automatización. En este caso de los sistemas mineros.

## LA INDUSTRIA MINERA EN MÉXICO

como en el campo de los energéticos, afectan la demanda de los minerales tradicionales, aumentando a su vez la demanda de los minerales no convencionales. Estos minerales (no convencionales) pueden ser clasificados en cuatro grupos: metales avanzados, cerámicas avanzadas, materiales compuestos y polímeros avanzados.

### 1.3 PERSPECTIVAS DE LA INDUSTRIA MINERA EN MÉXICO

Las inversiones en el periodo de 1990 a 1991 en el sector minero alcanzaron 900 millones de dólares. Con la nueva Ley Minera el gobierno mexicano pretende atacar los principales factores que influyen en el desarrollo de la minería, esperando un aumento en las inversiones por 700 millones de dólares en un año, a través de la inversión extranjera, privatizaciones en el sector y simplificación en los procesos administrativos para la obtención de concesiones.

Las inversiones en el área de exploración representaron el 36% de los 327 millones de dólares invertidos en 1991. La exploración para mantener o expandir las reservas de los yacimientos ya conocidos consumió la mayor parte de estos recursos, creando un déficit en la exploración de nuevos yacimientos; esto ha contribuido al estancamiento de la actividad minera y al agotamiento de las reservas nacionales (de 6 millones de hectáreas de la reserva minera nacional 3.2 millones de hectáreas se han agotado), lo que se refleja en el bajo índice de crecimiento de la industria minera en los últimos cinco años.

Las medidas gubernamentales enfocadas a la solución de este problema comprenden la canalización de inversiones en este renglón hacia la búsqueda de nuevos yacimientos, obligando a los concesionarios a presentar comprobantes de cada uno de los trabajos de exploración y en general de todos aquellos que contribuyan al conocimiento geológico, geofísico y geoquímico de los lotes concesionados (Artículo 29, Fracciones I a XII de la Ley Minera).

La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal será la entidad gubernamental encargada de regular y promover la exploración, al igual que el aprovechamiento racional y preservación de los recursos mineros del país, en colaboración con el Consejo de Recursos Minerales. Este último tendrá entre sus objetivos el desarrollo, introducción y adaptación de nuevas tecnologías con el fin de mejorar la exploración, explotación y aprovechamiento de los recursos minerales de la nación.

Por otro lado la escasa participación de la minería en el producto interno bruto del país, así como las contracciones en el mercado internacional hace que el crecimiento de este sector dependa fundamentalmente de la demanda externa. Sin embargo, una estabilización de la economía que permita el crecimiento sostenido del país, beneficiaría de manera sustancial el crecimiento y desarrollo del sector minero y ayudaría a reducir el impacto externo en la actividad minera, ya que los insumos industriales generados serían captados por la economía interna del país haciendo que la demanda externa sea complementaria fortaleciéndose de esta manera el sector minero (Gutierrez y García, 1993).

## CAPITULO II

## YACIMIENTOS MINERALES

## II.1 TIPOS DE YACIMIENTOS MINERALES

Un yacimiento mineral puede ser producto tanto de procesos ígneos, sedimentarios, metamórficos o de meteorización, y su ubicación es generalmente el resultado de varios factores. Cada uno de estos factores explicaría una característica del yacimiento como el tamaño, tipo de depositación, etc.

Los yacimientos minerales pueden ser *primarios* y *secundarios*. Los yacimientos primarios son aquellos que han mantenido su composición química y relación espacial con las rocas que lo circundan desde su formación y se dividen a su vez en *singénéticos* y *epigenéticos*.

Los yacimientos *singénéticos* se forman simultáneamente con las rocas ígneas y sedimentarias que los circundan, en tanto que los yacimientos epigenéticos son posteriores a la formación de las rocas encajonantes por rellenos de vacíos o remplazamiento de los minerales preexistentes. Muchos de los yacimientos *epigenéticos* están limitados a áreas que han sufrido cierta "preparación" que favorece la depositación, esta preparación hacer que las rocas regionales sean receptivas o más reactivas a las soluciones mineralizantes y depende tanto de la roca original como del agente preparador (calor, fluidos, tectónica o una combinación de los tres). A este proceso se le conoce como *preparación del terreno* o *de la roca*. Los yacimientos *singénéticos* no requieren de una preparación previa puesto que ellos son depositados como parte de la roca original.

En el caso de los yacimientos *secundarios* diversos procesos de erosión conducen a cambios en la composición química, características físicas y posición espacial de los minerales, produciendo concentraciones que los hacen económicamente explotables (Siderenko, 1971). Los yacimientos *secundarios* pueden agruparse en:

*Yacimientos sedimentarios.*- Son el resultado de diversos procesos de sedimentación. Dentro de este grupo los yacimientos de placer (fluviales, marinos, eólicos y glaciales) son los más importantes (Gardner, 1955; Ludwig y Vollbrecht, 1957; Guilcher, 1959; Sigov, 1971; Helgren, 1979). Los yacimientos de evaporitas son otro tipo de yacimientos sedimentarios asociados a la evaporización marina o a medio ambiente de playa (Johnson, 1968; Watson y Ansino, 1969; Reimnitz, 1970). Dentro de los yacimientos evaporíticos se encuentran minerales tales como el sodio, potasio, anhidrita, talco y borato entre otros.

*Yacimientos de erosión.*- Son el resultado de la alteración química y desintegración de cierto tipo de rocas bajo la influencia de la humedad y del medio ambiente. Estos

## YACIMIENTOS MINERALES

procesos pueden conducir a laterización<sup>1</sup> o bauxitización<sup>2</sup> que dan como resultado la formación de yacimientos de hierro, níquel, manganeso entre otros (Verstappen, 1959; Thomas, 1966; Faniran, 1971). Otro tipo de ocurrencia es el desgaste de los afloramientos de los cuerpos mineralizados llamados *gossan* compuesto de productos oxidados e hidratados (hematita, limonita y compuestos de cobre, plomo y zinc).

*Yacimientos de por la actividad del agua subterránea.*- Estos yacimientos son el resultado de concentraciones minerales por el agua subterránea percolada. Lixiviación y redepositación pueden llevar a concentraciones de minerales. La depositación puede ocurrir en vetas, sumideros y planos de estratificación.

### II.2 CONTROLES ESTRUCTURALES

Otra parte esencial de los yacimientos minerales son las estructuras, debido a que el movimiento de los fluidos subterráneos está controlado por la permeabilidad de la roca así como por los elementos estructurales. Las estructuras y texturas que controlan la depositación mineral pueden ser primarias o secundarias (sobreimpuestas) dependiendo si éstas se formaron junto con la roca o tiempo después de su formación.

Las estructuras y texturas primarias de las rocas controlan la distribución de los fluidos y por consiguiente la ubicación de menas. La variedad de los controles primarios es prácticamente ilimitada siendo las más evidentes: calizas o dolomías permeables, estructuras arrecifales, conglomerados, capas de lavas quebradizas y capas escoriáceas, areniscas permeables y cuellos y domos volcánicos.

En la mayoría de los yacimientos epigenéticos, los caminos seguidos por los fluidos mineralizantes han estado notablemente influenciados por las estructuras secundarias de las rocas. Las fallas y los pliegues son estructuras secundarias más frecuentes, aunque las zonas de brechas, las chimeneas y otros rasgos son localmente de gran importancia.

Las fallas se encuentran en casi todas las partes y muchos yacimientos están directamente relacionados a ellas. El movimiento a lo largo de una falla produce brechas y rellenos de falla. Estos últimos impiden normalmente el paso de los fluidos. Por otro lado, una brecha de grano grueso puede aumentar la permeabilidad permitiendo el paso de los fluidos mineralizantes. Por consiguiente las fallas menores son mejores conductoras de las soluciones mineralizantes que las fallas complejas con grandes desplazamientos los cuales tienden a desarrollar rellenos de falla (Park y MacDiarmid, 1981; Guilbert y Park, 1986).

### II.3 CLASIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS MINERALES

Los sistemas de clasificación usados hoy en día son el *vulcánico-plutónico* de Niggli, el de *mena-asociación* de Scheiderhöhn y el de Lindgrén de *profundidad*.

<sup>1</sup> Transformación superficial de un suelo en laterita. La laterita es un suelo de color rojo rico en óxidos de hierro y aluminio.

<sup>2</sup> Transformación de un suelo en bauxita. La bauxita es una mezcla compleja de minerales compuesta de hidratos de alumina, diápora, etc.

## YACIMIENTOS MINERALES

*temperatura*. Estas tres clasificaciones fueron desarrolladas durante la primera parte de este siglo.

La clasificación de Niggli (1929) agrupa los yacimientos *epigenéticos* en *volcánicos* o *próximos a la superficie* y *plutónicos* o de *asentamiento profundo*. Los yacimientos *plutónicos* son divididos en *hidrotermales*, *pegmatíticos-neumatolíticos* y *ortomagmáticos*, dependiendo si las menas se formaron a partir de líquidos o gases o como producto directo de la cristalización dentro del magma (Tabla II.1).

Tabla II.1 Clasificación de yacimientos minerales de Niggli

---

<b>I. PLUTÓNICO O INTRUSIVO</b>
A. Ortomagmáticos
1. Diamante, Platino-cromo
2. Titanio-hierro-níquel-cobre
B. Neumatolítico o Pegmatítico
1. Metales pesados-alcálidos tercos-fosforo-titanio
2. Silicatos-álcalis-fluor-boro-estaño-molibdeno-wolframio
3. Asociaciones Turmalina-cuarzo
C. Hidrotermal
1. Hierro-cobre-oro-arsénico
2. Plomo-zinc-plata
3. Níquel-cobalto-arsénico-plata
4. Carbonatos-óxidos-sulfatos-fluoruros
<b>II. VOLCÁNICOS O EXTRUSIVOS</b>
A. Estaño-plata-bismuto
B. Metales pesados
C. Oro-plata
D. Antimonio-mercurio
E. Cobre nativo
F. Volcanes subacuáticos y depósitos bloquímicos

---

Schneiderhöhn (1941) clasifica los yacimientos minerales de acuerdo a la naturaleza de los fluidos mineralizantes, las asociaciones minerales, las diferencias entre la deposición superficial y profunda y el tipo de mineralización (económica o de ganga) (Tabla II.2).

Tabla II.2 Clasificación de yacimientos minerales de Schneiderhöhn

---

<b>I. YACIMIENTOS INTRUSIVOS Y LÍQUIDOS MAGMÁTICOS</b>
<b>II. YACIMIENTOS NEUMATOLÍTICOS</b>
A. Filones pegmatíticos
B. Filones neumatolíticos e impregnaciones
C. Remplazamiento neumatolítico de contacto
<b>III. YACIMIENTOS HIDROTERMALES</b>
A. Asociaciones oro-plata
B. Asociaciones pirita-cobre
C. Asociaciones plomo-plata-zinc
D. Asociaciones plomo-cobalto-níquel-bismuto-uranio
E. Asociaciones estaño-plata-wolframio-bismuto
F. Asociaciones antimonio-mercurio-arsénico-selenio
G. Asociaciones de no sulfuros
H. Asociaciones de no metales
<b>IV. YACIMIENTOS EXHALATIVOS</b>

---

En 1913 Lindgren introduce su clasificación (Tabla II.3), la cual es usada hoy en día casi en su forma original. En 1933 y 1935 se introdujeron los términos *teletermal* y

## YACIMIENTOS MINERALES

*xenothermal* por Graton y Buddigton respectivamente. El término *hidrothermal* empleado por Lindgren en su clasificación significa "agua caliente" y no implica asociaciones magmáticas. Las denotaciones de presión y temperatura son solamente aproximadas y por lo tanto sujetas a constantes modificaciones (Park y MacDiarmid, 1981).

Tabla II.3 Clasificación de Lindgren (modificada) de yacimientos minerales

### I. DEPÓSITOS PRODUCIDOS POR PROCESOS QUÍMICOS DE CONCENTRACIÓN: LAS PRESIONES Y TEMPERATURAS VARIAN ENTRE LÍMITES AMPLIOS.

#### A. EN MAGMAS POR PROCESOS DE DIFERENCIACIÓN

1. Yacimientos propiamente magmáticos, yacimientos de segregación magmática, yacimientos por inyección. Temperatura entre 700°C y 1500°C. Presiones muy altas.
2. Pegmatitas. Temperatura muy alta a moderada. Presión muy alta

#### B. EN FORMACIONES DE ROCAS

1. Concentración efectuada por introducción de sustancias extrañas a las rocas (epigenético).
  - a. Origen dependiente de la erupción de las rocas ígneas
    - i. Yacimientos volcanogénicos asociados normalmente a acumulaciones volcánicas. Temperatura entre 100°C y 600°C. Presión atmosférica a moderada.
    - ii. A partir de masas efusivas, sublimados, fumarolas. Temperatura de 100°C a 600°C. Presión atmosférica a moderada.
    - iii. A partir de masas efusivas (yacimientos ígneos metamórficos). Temperatura que oscila probablemente entre 500°C y 800°C. Presión muy alta.
  - b. Por agua caliente ascendente de origen incierto probablemente magmáticas, metamórficas, oceánicas, conatas o meteóricas.
    - i. Yacimiento hipotermales. Deposición y concentración a grandes profundidades, temperatura y presión elevada. Temperatura entre 300°C y 500°C. Presión muy alta.
    - ii. Yacimientos mesotermales. Precipitación y concentración a profundidades intermedias. Temperatura de 200°C a 300°C. Presión alta.
    - iii. Yacimientos epitermales. Precipitación y concentración a poca profundidad. Temperatura de 50°C a 200°C. Presión moderada.
    - iv. Yacimientos telotermales. Precipitación a partir de soluciones gastadas. Temperaturas y presiones bajas. El término más alto de rango hidrotermal.
    - v. Yacimientos xenotermales. Precipitación y concentración a profundidades someras, pero a temperaturas altas. Temperatura alta a baja. Presión moderada a atmosférica.
  - c. Origen por aguas meteóricas circulando a profundidades moderadas. Temperatura superior a 100°C. Presión moderada.
2. Por concentración de sustancias contenidas en el propio conjunto geológico.
  - a. Concentración por metamorfismo dinámico regional. Temperatura superior a 400°C. Presión alta.
  - b. Concentración por aguas subterráneas de circulación más profunda. Temperatura de 0°C a 100°C. Presión moderada.
  - c. Concentración por desintegración de la roca y alteración residual cerca de la superficie. Temperatura 0°C a 100°C. Presión moderada a atmosférica.

#### C. EN MEDIOS ACUOSOS

1. Volcanogénicos. Emanaciones termales submarinas asociadas con volcanismo. Temperatura alta a moderada. Presión baja a moderada.
2. Por interacción entre soluciones. Temperatura de 0°C a 70°C. Presión moderada
  - a. Reacciones inorgánicas
  - b. Reacciones orgánicas
3. Evaporización de los disolventes

### II. YACIMIENTOS PRODUCIDOS POR PROCESOS MECÁNICOS DE CONCENTRACIÓN. TEMPERATURA Y PRESIÓN MODERADA A BAJA.



## CAPITULO III

# AMBIENTE TECTÓNICO Y MINERALIZACIÓN

### III.1 PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

En el estudio de los ambientes tectónicos relacionados a la mineralización es conveniente considerar los conceptos de *provincia metalogénica* y *época metalogénica*.

Una *provincia metalogénica* se define como una entidad de yacimientos minerales que se caracteriza por composiciones minerales y por la forma e intensidad de la mineralización (Petroscheck, 1965). Para Bateman (1950) una provincia metalogénica es una región caracterizada por una mineralización relativamente abundante con un tipo predominante de mineral. Una provincia metalogénica varía desde un distrito minero hasta regiones que se extienden cientos o miles de kilómetros e incluyen yacimientos de diferente edad y génesis los cuales se han formado en algunos casos en diversos ambientes tectónicos (Mitchell y Garson, 1981).

Una época metalogénica es el intervalo de tiempo más favorable para la depositación de ciertas sustancias útiles (Lindgren, 1933). Turneaure (1955) usa el término para designar períodos en los que la depositación mineral fue más pronunciada. El estudio del ambiente tectónico y su relación con las provincias metalogénicas puede ser de gran ayuda en la exploración minera a escala regional.

### III.2 AMBIENTE TECTÓNICO COMO UN CONTROL DE LA MINERALIZACIÓN

El ambiente tectónico en el cual se forma una sucesión particular de rocas puede ser definido como la localización relativa de los mayores rasgos de la corteza terrestre dentro de la cual las rocas, incluyendo asociaciones de minerales de una misma edad, fueron depositados, intrusionados o -menos frecuentemente- formados como resultado de deformación y metamorfismo (Mitchell y Garson, 1981).

El objetivo de relacionar los yacimientos minerales al ambiente tectónico de obtener un indicador del potencial minero de las rocas formadas en los diferentes ambientes, porque los ambientes tectónicos ejercen un mayor control en la forma, tipo de mineralización, deformación y conservación de los yacimientos minerales que los medios ambientes locales (sedimentarios o volcánicos). Por ejemplo, en general, el volcanismo calci-alcalino y rocas plutónicas son producidas en los arcos magmáticos relacionados a las zonas de subducción.

Las fallas juegan un papel muy importante en la circulación de los fluidos mineralizantes y por lo tanto en la deposición de minerales. Si bien su influencia en la formación de rocas es indirecta y confinada a la erosión y sedimentación de áreas adyacentes, estas se consideran como un tipo de ambiente tectónico.

La clasificación de los cuerpos mineralizados con base en su relación con los ambientes tectónicos no es estricta dado que algunos tipos de yacimientos ocurren en más de un tipo de ambiente tectónico. Por ejemplo, los cuerpos mineralizados de cobre pueden ser formados en ambiente de cordillera oceánica o arcos magmáticos. Sin embargo, las consideraciones de los ambientes tectónicos en los cuales los yacimientos minerales son formados, han consolidado una clasificación de yacimientos en función de la tectónica global.

### III.3 TECTÓNICA DE PLACAS Y YACIMIENTOS MINERALES

A principios de los años 60's Hess y después Dietz y Wilson sugieren que el fondo oceánico se forma en las cordilleras oceánicas y se destruye en zonas sísmicas activas alrededor de las márgenes oceánicas. Evidencias de las anomalías magnéticas de la expansión del fondo oceánico obtenidas por Vine y Matthews (1963) sostienen esta hipótesis que precede a la teoría de tectónica de placas. La teoría de tectónica de placas reconoce que el fondo oceánico se crea en los centros de expansión y descendiendo a lo largo de una zona sísmica inclinada llamada *zona de Benioff*. La corteza generada en las cordilleras oceánicas y subducida bajo las trincheras se considera como una placa rígida, compuesta por corteza oceánica de alrededor de 5 Km de espesor que cubre el manto superior, aumentando su espesor a 80 Km aproximadamente al extenderse por debajo de los continentes. La consecuencia de esta hipótesis es que los movimientos de las placas en el pasado se desarrollaron a lo largo de *fallas de transformación* (Mitchell y Garson, 1981).

Los primeros intentos de relacionar los yacimientos minerales a las fronteras de placas se dieron al inicio de los años setenta, concentrándose en gran parte en los yacimientos de pórfidos de cobre y por lo tanto en la subducción relacionada a arcos magmáticos en los cuales estos ocurren. Los siguientes tipos de mineralizaciones relacionados a ambientes tectónicos fueron los sulfuros masivos estratiformes como el de Kuroko en Japón (Sawkins, 1972; Guild, 1972) y los asociados con lavas basálticas submarinas como los de Chipre (Sillitoe, 1972). Otros yacimientos interpretados en términos de ambientes tectónicos incluyen asociaciones de estaño-tungsteno en márgenes continentales relacionados a la zona de Benioff en América del Sur (Mitchell y Garson, 1972; Mitchell, 1973).

Desde 1972 los tipos de yacimientos minerales relacionados a ambientes tectónicos tienden a incrementarse rápidamente. Algunos autores explican los posibles tipos de mineralización característicos de un ambiente tectónico particular; otros el tipo de ambiente en que un cuerpo mineralizado en particular puede formarse (aunque en general esto ha sido en arcos magmáticos) y por último los que enfatizan la importancia de las fallas de transformación y zonas de fractura en la localización de una variedad de tipos de cuerpos mineralizados (Mitchell y Garson, 1976; Kutina, 1980).

### III.4 YACIMIENTOS RELACIONADOS CON AMBIENTES DE SUBDUCCIÓN

La distribución de las zonas de subducción sugiere que generalmente se localizan en la frontera entre la corteza oceánica y corteza más gruesa. Esta última consiste en algunos casos de corteza continental y en otros de corteza oceánica con un espesor anormal. La subducción es normalmente continua hasta que la cresta oceánica colisiona o la placa cambia su movimiento relativo, lo que trae como consecuencia la creación de fallas de transformación.

Los ambientes de subducción relacionados a la mineralización incluyen los arcos magmáticos post-arco, con abundantes yacimientos hidrotermales sinécticos y epigenéticos.

Los arcos volcánicos activos forman la mayoría de los rasgos observables de todos los sistemas de arcos, incluyen un alto porcentaje de los volcanes del mundo y están situados dentro de las zonas de mayor sismicidad. Presentan una forma arqueada o rasgos no lineales o sinuosos de miles de kilómetros de largo con volcanes concentrados en cadenas. La mayoría de estos arcos se sitúan en el cinturón Circum-Pacífico como es el de las Islas Aleutianas, Pacífico del Oeste, Indonesia, Caribe y Andino.

Los arcos volcánicos se caracterizan por un bajo positivo gravimétrico y un alto gradiente geotérmico. Bajo los arcos activos existe una zona de focos de sismos o zona de Benioff localizada entre los 100 y 250 Km, debajo de los volcanes activos y cercana a la superficie bajo la trinchera submarina adyacente. Los arcos volcánicos inactivos están comunmente muy erosionados, mostrando un cinturón de plutones de composición diorítica a granodiorítica los cuales han sido interpretados como la "raíz" de los volcanes. Las rocas que encajonan estos plutones pueden presentar metamorfismo de baja presión y alta temperatura.

Los arcos volcánicos se clasifican en *arcos de margen continental* y *arcos de islas oceánicas*. En los arcos de margen continental, la corteza bajo el arco se encuentra teóricamente bajo esfuerzos de compresión debido a la convergencia de las placas. Muchas cadenas volcánicas sufren fracturamiento en bloques, dando origen a estructuras en graben paralelas u oblicuas al arco. Las rocas volcánicas son calco-alcálicas de composición ácida a intermedia y rara vez basálticas; provienen de estratovolcanes formados principalmente por piroclastos, lavas e ignimbritas.

En general, en los arcos de margen continental el espesor de las sucesiones de sedimentos volcanogénicos acumulados en los flancos de los volcanes (particularmente en las fallas) pueden estar interestratificados. Entre los volcanes y sus flancos, extensas áreas de rocas pre-volcánicas están expuestas y consisten principalmente de rocas metamórficas y sedimentarias levantadas, incluyendo plutones emplazados durante el volcanismo cuaternario. Estos plutones son principalmente de tonalita y granodiorita con mayor cantidad de diorita y granito.

## AMBIENTE TECTÓNICO Y MINERALIZACIÓN

Los arcos de islas oceánicas están separados del continente por la corteza oceánica formando comúnmente una cuenca marginal. Estos arcos fueron descritos en detalle por primera vez en Indonesia y el Pacífico del Oeste. Subsecuentemente se observó la distribución arqueada de volcanes en el Caribe. En contraste con los arcos de margen continental los cuales ocurren predominantemente en la cara oeste de las márgenes continentales, la mayoría de los arcos interoceánicos ocurren en el lado este. Las rocas volcánicas son principalmente de composición andesítica, aunque algunas veces se tienen rocas basálticas o dacíticas.

La relación genética entre la corteza oceánica subducida a lo largo de la zona de Benioff y la generación de arcos volcánicos magmáticos fue sugerida en 1962 por Coast para el arco Aleutiano y aceptada ampliamente a finales de los años 60's.

Ideas sobre las relaciones del volcanismo de arco con la subducción han sido desarrolladas en particular para los Andes, donde existe una "brecha" en el arco volcánico en todo el norte y centro de Perú en donde la zona de Benioff se prolonga a una profundidad de alrededor de 100 Km. Una explicación para esta "brecha" volcánica y para las características de la zona sísmica adyacente, es la postulación de una zona de Benioff muy superficial con un buzamiento de 10° a 15° para el Plioceno Inferior y el Cuaternario (Megard y Philip, 1976). El soporte para las relaciones postuladas entre la zona de Benioff con un buzamiento muy superficial y la ausencia de volcanismo de arco en Perú esta dado por la distribución de las rocas volcánicas en la parte central de la Cordillera Oeste de Norteamérica, que ha sido relacionada con la subducción a lo largo de una zona de Benioff con un buzamiento superficial anormal inferido del contenido de potasio de las rocas volcánicas (Coney, 1976; Dickinson, 1978).

### III.4.1 Arcos volcánicos magmáticos

Las rocas de los arcos magmáticos probablemente contienen más minerales económicos por unidad de área que las rocas formadas en algún otro ambiente tectónico. Entre los diferentes tipos de mineralización, el mayor tonelaje de extracción de metales se sitúa indudablemente en los yacimientos de pórfidos de cobre. Sin embargo, los yacimientos de metales base y oro son también importantes y en menor grado pero también significativo es la mineralización de estaño.

#### *Yacimientos de pórfidos de cobre*

Los yacimientos de pórfidos de cobre usualmente incluyen una menor cantidad de oro o molibdeno. Este tipo de yacimientos producen alrededor de dos terceras partes de la producción total de cobre del mundo. Los yacimientos económicamente explotables son cuerpos mineralizados trabajados a cielo abierto con rangos de 0.25% al 1% de cobre diseminado en rocas calci-alcálinas principalmente plutones porfídicos e intrusiones subvolcánicas con una composición que varía de diorita a cuarzo-monzonítica.

### ***Yacimientos de sulfuros Tipo Kuroko Zn-Pb-Cu(Au-Ag)***

Los yacimientos de sulfuro estratiformes de cobre, plomo y zinc se clasifican de acuerdo al ambiente tectónico, naturaleza de la roca encajonante o a la cantidad de metal (Salomon, 1976) y en términos de la naturaleza de los fluidos mineralizantes. En esta sección se consideran los yacimientos de Zn-Pb-Cu llamados también polimetálicos, predominantemente estratiformes en piroclastos y epiclastos (usualmente lavas ácidas calcialcalinas de arco volcánico). Los sulfuros formados en este ambiente forman la mayor clase de cuerpos mineralizados reconocidos como singenéticos y típico de arco de isla (Stanton, 1955, 1960). Hoy en día esta clase de yacimientos son llamados *Tipo Kuroko*.

Los yacimientos tipo Kuroko del Cenozoico ocurren en secuencias volcánicas marinas de arcos de islas (p.e. los yacimientos de Japón y Fiji), aunque yacimientos similares de edad Mesozoica han sido reconocidos en rocas volcánicas submarinas que fueron probablemente de arco de margen continental. Por ejemplo, los yacimientos de Zn-Pb-Cu-Ag de Campo Morado en México (Lorinezi y Miranda, 1978). En la mayoría de los cuerpos mineralizados del Fanerozoico los metales en orden de abundancia son Fe-Zn-Pb-Cu con una cantidad menor y variable de Au y Ag. Algunas veces talco y barita están presentes con los sulfuros pudiendo formar yacimientos económicos. El alto contenido de hierro en todos los yacimientos refleja la abundancia de pirita.

### ***Yacimientos Tipo Manto***

Los yacimientos tipo manto ocurren como estratos de hasta 100 m de espesor y varios kilómetros de longitud en rocas volcánicas calci-alcalinas del Jurásico al Cretácico Inferior en Chile y Sur del Perú (Carter, 1960; Ruiz et al., 1971). Los sulfuros consisten principalmente de calcocita, bornita, calcopirita en rellenos de vesículas y fracturas en la parte superior del flujo andesítico, tobas de flujos de ceniza, en volcaniclastos asociados y calizas (Sillitoe, 1977). Sillitoe considera que estos yacimientos fueron generados en un arco volcánico de margen continental o subaéreo o de medio ambiente de laguna local, por circulación de agua meteórica a través de rocas volcánicas calientes. También sugiere que los yacimientos volcanogénicos "tipo mexicano" pudieron haber tenido un origen similar. En el oeste de México estos yacimientos presentan una menor cantidad de casiterita y hematita en rocas volcánicas félsicas del Terciario.

### ***Yacimientos de estaño y tungsteno***

Los yacimientos de estaño ocurren en arcos de margen continental del Cenozoico Tardío. Por ejemplo, la ocurrencia de estaño en granitos Miocénicos del arco Aleutiano en Alaska (Reed y Lanphere, 1973) y casiterita en lavas riolíticas del Oligoceno de la Sierra Madre Occidental en México (Swanson, et al., 1978). La asociación común de casiterita y yacimientos de tungsteno ha sido explicada por Ishihara (1977) para un cinturón de rocas graníticas del Cretácico Inferior al Paleoceno, en la Isla Honshu con pequeñas cantidades de

W-Sn-Cu en vetas formadas en un ambiente de margen continental análogo al de México y Alaska.

### *Yacimientos de oro*

Las mineralizaciones de oro están comúnmente asociadas con rocas de arcos magmáticos formando yacimientos económicos primarios o de placer.

Existen diferentes tipos de yacimientos primarios y su distribución refleja la tendencia del oro a ocurrir en los arcos de islas más que en los arcos de margen continental (Mitchell y Garson, 1981). Las vetas auríferas de cuarzo en andesitas fueron descritas por Lindgren (1933) en una sucesión de andesitas propilitizadas y flujos dacíticos del Terciario Inferior en la Península Hauraki de Nueva Zelanda. La concentración y migración del oro fue probablemente acompañada por metamorfismo de las andesitas. Teluros de oro han sido descritos en la Mina Emperador en Viti Levu en Fiji. Su mineralización se presenta en rocas andesíticas brechadas del Plioceno, asociada y en parte controlada por una falla que limita la caldera (Denholm, 1967). En Vundu, Fiji, Lawrence (1978) describe un yacimiento subeconómico de pórfido de oro. Aunque los yacimientos de pórfidos de cobre ricos en oro ocurren tanto en arcos de islas como en arcos de margen continental (Sillitoe, 1979), este yacimiento es importante porque es el único ejemplo conocido de mineralización de pórfido de oro (Mitchell y Garson, 1981). Un cuarto modo de ocurrencia de oro en los arcos magmáticos es la asociada con vetas de cuarzo alrededor de las márgenes de plutones dioríticos o granodioríticos como en las Islas Salomón y Filipinas. El oro ocurre en fallas y fracturas en rocas sedimentarias y volcánicas de facies de arco volcánico del Mesozoico Superior al Oligoceno.

### *Yacimientos de Magnetita-Hematita-Apatito*

Un número de yacimientos de hierro del Fanerozoico y Proterozoico, asociada con rocas volcánicas ácidas, consisten en su mayoría de magnetita con una menor cantidad de hematita, fluopatita y actinolita. El ambiente tectónico y modo de ocurrencia del yacimiento El Lago del Plioceno-Pleistoceno en el norte de Chile (Park, 1961), indica una posible analogía para algunos de los cuerpos mineralizados más antiguos, aunque la posición de los yacimientos sugiere un cinturón magmático post-arco más que de arco magmático. En México, en la Sierra Madre Occidental, interpretada como un arco magmático de edad Cenozoica (Gunn y Mooser, 1971). La mayor fuente de yacimientos de hierro se componen principalmente de hematita y magnetita en una sucesión de rocas riolíticas (Swanson et al., 1978).

### *Yacimientos de Antimonio-Tungsteno-Mercurio*

Muchos yacimientos de antimonio y tungsteno del Mesozoico Superior y Cenozoico son epigenéticos, asociados con plutones graníticos (p.e. los yacimientos del sureste de China). Sin embargo, una clase importante de cuerpos mineralizados comprende

## AMBIENTE TECTÓNICO Y MINERALIZACIÓN

yacimientos de W-Sb-Hg reconocidos primeramente en el este de los Alpes y están asociados con rocas volcánicas (Maucher, 1965). Holl y Maucher (1976) y Holl (1977) consideran que la mineralización fue inicialmente singenética y relacionada con la erupción de las lavas adyacentes. Las rocas volcánicas son principalmente básicas, pero rocas de composición intermedia están también presentes. Holl (1977) han interpretado la distribución de W, Sb y Hg en los Alpes, en términos de su posición relativa al buzamiento inferido de la zona de Benioff.

### *Yacimientos de Mercurio*

Los yacimientos de mercurio asociados a rocas volcánicas calci-alcálinas ocurren en Filipinas, Japón y Nueva Zelanda y en los arcos magmáticos de margen continental de México y Chile. También son conocidos este tipo de yacimientos en cinturones volcánicos del Mesozoico y Cenoico en los arcos de las Kirules y Kamchatka (Comunidad de Estados Independientes) donde son llamados *yacimientos hidrotermales volcanogénéticos*. Las rocas encajonantes son principalmente de composición andesítica a dacítica comúnmente con una intensa alteración hidrotermal.

### *Yacimientos de Sulfuros Nativos*

Los yacimientos de sulfuros nativos son explotados tanto en arcos de margen continental (p.e. Los Andes) como en arcos de islas (p.e. Japón). La distribución de estos yacimientos tiene poca relación con la zona de Benioff (Mitchell y Garson, 1981).

## III.5 ARCOS MAGMÁTICOS Y YACIMIENTOS MINERALES RELACIONADOS AL AMBIENTE DE SUBDUCCIÓN EN MÉXICO

Dos arcos magmáticos bordean la margen pacífica de México (Gunn y Mooser, 1970). En la parte noroeste, el primero de ellos está representado por la Sierra Madre Occidental con aproximadamente 1,200 Km de longitud paralelo a la línea de costa. Este arco se encuentra localmente cubierto en su extremo sur por el segundo arco llamado Eje Neovolcánico Transmexicano, con una dirección este-oeste y caracterizado por estratovolcanes de más de 5,400 m.s.n.m.

### III.5.1 Regímenes Magmáticos

Demant y Robin (1975) describen una serie de diferentes eventos magmáticos de composición química variable, que empiezan en la provincia de Baja California y se continúa en la Sierra Madre Occidental, el este de México y finalmente en el Eje Neovolcánico desde el Mioceno. Lavas calci-alcálinas (ignimbritas) en la Sierra Madre Occidental, magmatismo alcalino en la provincia este y volcanismo calci-alcálico en el Eje Neovolcánico (Clark, et. at., 1982). Damon (1978) y Clark y otros (1978) reconocen un patrón similar.

## AMBIENTE TECTÓNICO Y MINERALIZACIÓN

El primer evento (Jurásico-Triásico) se encuentra representado en las localidades de Puerto Vallarta y El Cuale (Jalisco) donde se han observado plutones con tendencia calci-alcalina de edad Jurásica (González y Torres, 1988). El segundo evento define el cambio de magmatismo entre los 140 y 16 m.a. avanzando hacia el este de la antigua margen pacífica y retrocediendo hacia la margen continental en el Mioceno Superior después de haber permanecido estático por poco tiempo (Clark, et al., 1982). Este evento refleja un regimen de arco de isla y está representado por las andesitas y sedimentos de la Formación Alisitos de Baja California (Silver, et al., 1963; Gastil, et al., 1975) y en las calizas del Cretácico en Sonora y Sinaloa (Bonneau, 1970). El tercer evento magmático marca la expansión en el Golfo de California, cesa el magmatismo relacionado a la subducción después del comienzo del fallamiento transcurriente en la región. La continuación magmática bimodal es sugerida por las lavas máficas intercaladas en la Sierra Madre Occidental (MacDowell y Clabaugh, 1979; Schuelbel, 1983) (Figura III.1).

El diagrama de la figura III.1 muestra un arco Jurásico seguido de un arco Cretácico, el cual avanzó lentamente hasta hace 80 m.a. cuando la convergencia se incremento apresuradamente. En esta época el arco se desplazó al este en el norte de México hasta el Oligoceno cuando se replegó al oeste. El magmatismo de composición intermedia fue continuo en tiempo pero no en espacio (Damon y Clark, 1981), durante ambas progresiones al este y la subsecuente regresión al oeste. La composición del volcanismo con respecto a la distancia desde la trinchera varió en composición debido al cambio de calci-alcálido a alcalino en dirección este (Damon y Clark, 1981). El magmatismo calci-alcálido fue constante mientras la subducción fue continua.

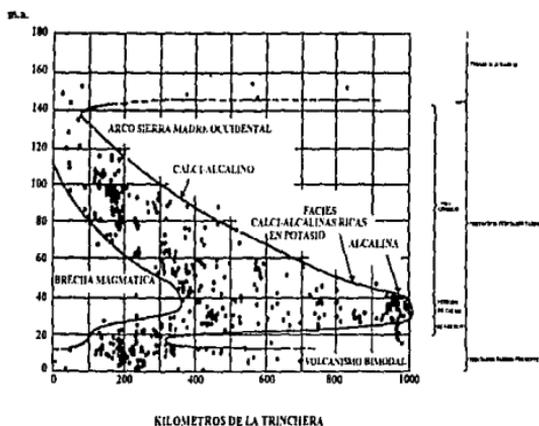


Figura III.1 Distribución de magmas en tiempo y espacio en el Norte de México. (Tomada de Clark et al., 1982)

### III.5.2 Subducción y migración de magmas

Clark y otros (1982) explican la migración en tiempo y espacio de la actividad ígnea en el norte de México en función del cambio en el ángulo de buzamiento de la zona de Benioff, debido a la variación en la razón de convergencia entre la Placa Norteamericana y la Placa Pacífica. A medida que la velocidad de convergencia se incrementó, la generación de magma se desplazó a profundidad dentro del continente alejándose de la trinchera. La disminución en la convergencia entre las placas (hace 40 m.a.) aumento el ángulo de incidencia causando la regresión de la zona de generación de magma en dirección de la trinchera. La figura III.2 muestra tres diferentes tipos de subducción durante el período de 140 a 20 m.a. en el norte de México (Clark, et al. 1982).

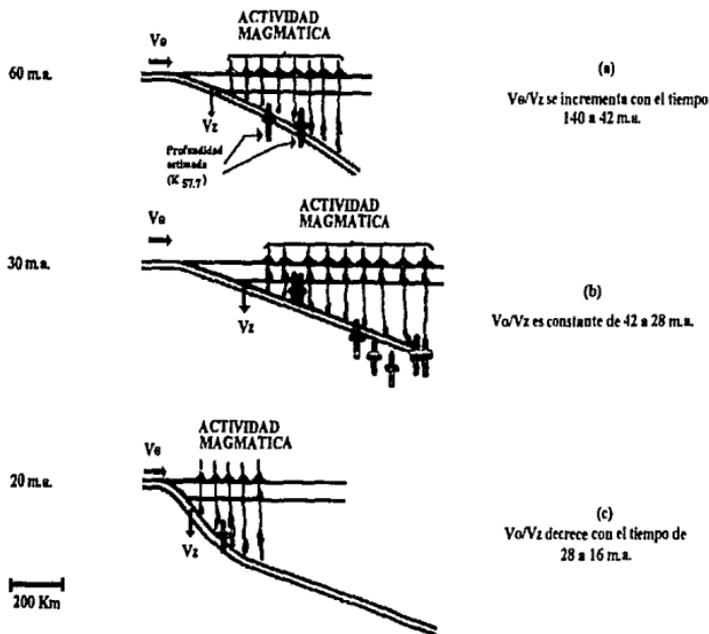


Figura III.2 Profundidades calculadas de la zona de Benioff para el norte de México usando la relación de Dickinson (1975) K<sub>57.5</sub>. (Tomada de Clark et al., 1982)

La figura III.2a presenta una sección alrededor de los 60 m.a. a finales del periodo caracterizado por el decrecimiento en los buzamientos de la zona de Benioff y el decrecimiento de la profundidad. Esto causó que la actividad magmática migrara al este. El avance hacia el este de la actividad magmática entre 120 y los 42 m.a. fue dominada por magmas andesíticos con volúmenes pequeños de rocas máficas y félsicas (Clark, et al., 1982). El predominio de los magmas intermedios sugiere que la mayor parte del magma generado durante este periodo fue derivado de la fusión parcial de los bloques subducidos o de capas superiores del manto (Ringwood, 1977).

La geometría de la zona de Benioff a los 30 m.a. cuando la actividad ígnea permaneció constante se muestra en la figura III.2b. El periodo entre los 42 y los 28 m.a. marca un cambio notable dado que: 1) las fronteras de magmatismo detienen su migración hacia el este alrededor de los 42 m.a. permaneciendo constante por 14 m.a.; 2) el tipo de magma dominante para los sitios calci-alcalinos cambia de andesítico a riolítico y 3) las rocas ígneas sobre las partes más profundas de la subducción se vuelven más alcalinas.

El decrecimiento en la migración del magmatismo, representa una transición de un régimen de subducción con buzamiento variable a un régimen temporal de buzamiento constante (Clark, et al., 1982). Algunas de las evidencias de este cambio en el régimen de subducción es el incremento de la alcalinidad en la parte este del arco entre los 45 y 35 m.a.. La actividad ígnea alcalina indica que la fusión empieza a ocurrir sobre la parte más profunda de la zona de subducción.

La figura III.2c muestra la configuración de la zona de Benioff antes de que la regresión del arco magmático finalizara y antes de la migración de la actividad ígnea relacionada a la subducción en el norte de México debido al encuentro del Rise-Trinchera entre los 20 y 10 m.a. (Dickinson y Snyder, 1979). Lo que trae como consecuencia que la actividad magmática se extinguiera rápidamente.

El incremento en el buzamiento de la zona de Benioff y la renovación del magmatismo alcalino indican la reanudación de un régimen de subducción con buzamiento y profundidad variable durante la regresión (Clark et. al. 1982).

### III.5.3 Aspectos tectónicos

El tectonismo asociado a los eventos magmáticos fueron continuos en tipo y discontinuos en espacio como consecuencia de dos procesos fundamentales: la migración del arco magmático como resultado de cambios en el movimiento de placas tectónicas (Coney y Reynold, 1977; Keith, 1978) y el levantamiento de las márgenes continentales en respuesta a ajustes isostáticos (Damon, 1979).

En el Cretácico Inferior México fue bordeado por un arco de tipo andino (Damon y Mauger, 1966), el cual evolucionó a un arco de isla en el Cretácico Medio (González y Torres, 1988). El choque de la placa Norteamericana con la placa oceánica del Pacífico provocó extensos levantamientos superiores al kilómetro de altura. Damon y Clark (1981) estiman que el levantamiento se inició durante el Cretácico Inferior a medida que la interacción del continente y la placa oceánica del Pacífico se lleva a cabo. En el Cretácico

Superior-Terciario Medio, se reinicia la tectónica de subducción en el occidente de México replegándose el arco hacia la costa del Pacífico en la península de Baja California lo que provoca el emplazamiento de rocas volcánicas y plutónicas (Serie Volcánica Inferior), levantamiento, erosión y producción de sedimentos clásticos debido al avance del arco hacia el continente. Su retroceso durante el Terciario Medio originó la formación de rocas volcánicas ácidas de la Serie Volcánica Superior (ignimbritas, lavas y volcanoclastos) que aflora en la Sierra Madre Occidental. En la parte central de México las rocas terciarias están representadas por el batolito Huacana en Michoacán, y hacia la parte sur de México por emplazamientos de granitos cerca de Acapulco (Fries, 1962). En Chiapas un intrusivo silíceo del Terciario Superior (22 a 10 m.a.), localizado alrededor de 200 Km de la trinchera, es considerado un segmento abandonado del arco volcánico mexicano-centroamericano (Damon y Montesinos, 1978). Este arco puede ser representado, aunque en forma discontinua, por rocas de edad similar en el área de los Tuxtlas (Mooser y Maldonado, 1967; Thorpe, 1977) y el arco volcánico Transmexicano (Watkins, 1971; Gastil, et al., 1978, 1979; Catagrel y Robin, 1979; Damon, et al., 1979).

### III.5.4 Mineralización relacionada a la migración del arco volcánico en México.

La mineralización en el norte de México ocurre durante la regresión hacia el este del arco magmático que fue dominada por erupciones de estratovolcanes andesíticos-dacíticos de composición calci-alkalina, formando cinturones de gran extensión con orientación NNW alineados paralelamente a los rasgos tectónicos. De acuerdo a lo anterior Burnham (1959) concluye que las provincias metalogénicas en México tienen un origen a profundidad, donde la distancia desde la margen continental parece ser un factor sobresaliente en la localización de zonas mineralizadas (Damon y Clark, 1981).

La composición del magma que está en función de la distancia desde la paleotrinchera es correlacionada con el zonamiento de los yacimientos minerales por Damon y Clark (1981). Por ejemplo, los yacimientos de pórfidos de Cu-Mo con rocas ígneas calci-alkalinas y alcalino-cálcicas, los yacimientos de vetas con rocas volcánicas calci-alkalinas y los yacimientos de U, Mo y  $\text{CaF}_2$  están asociados con magmas alcalinos.

Los yacimientos de pórfidos de Cu-Mo forman una franja de alrededor de 100 Km de ancho, que se extiende desde el estado de Guerrero en el sur de México hasta los Estados Unidos de Norteamérica. Estos yacimientos se formaron entre los 80 y 40 m.a. (Eoceno-Oligoceno Inferior) (Henry, 1975; Damon, et al., 1981; Pantoja, 1984) y están parcialmente traslapados por yacimientos de contacto de Cu-Pb-Zn-(Ag) y por yacimientos de Tungsteno en Sonora, Sinaloa, Chihuahua y Durango (figura III.3). La mayoría de los yacimientos más recientes ocurren a una distancia de 180 a 170 Km de la paleotrinchera. En la parte oeste de la Sierra Madre Occidental la provincia de pórfidos de cobre está traslapada por yacimientos de hierro e intrusionada por vetas de Ag y Au formadas durante la regresión del arco. En el lado Este se halla sobreyacida por riolitas intrusionadas por yacimientos de vetas de Pb-Zn-Ag formadas también durante la regresión del arco.

## AMBIENTE TECTÓNICO Y MINERALIZACIÓN

La zona con alto potencial de hierro (figura III.3) se extiende a lo largo de un arco magmático formado en la parte más cercana a la trinchera, constituyendo una franja de 700 Km de largo por 110 Km de ancho. Los yacimientos de hierro se localizan en el estado de Chihuahua, Coahuila y Zacatecas con una edad que varía de 32 a 25 m.a..

En la Sierra Madre Occidental se presentan yacimientos de vetas de fisura con dos asociaciones minerales Ag-Au y Pb-Zn-Ag-Au (Clark, et al., 1979a), y ocurren en los flancos Oeste y Este respectivamente; aunque las asociaciones de Pb-Zn con pequeñas cantidades de plata están más extendidas. Manifestaciones y yacimientos de oro y plata se encuentran a lo largo de una franja de aproximadamente 1,350 Km de largo desde el río Ameca en el estado de Jalisco hasta el Sur de Arizona en los Estados Unidos de Norteamérica con un ancho promedio de 110 Km. Dentro de esta franja se encuentran los yacimientos de la Sierra Zapotlán (Nayarit) y El Barqueño (Jalisco) (figura III.3). Las mineralizaciones tienen una época metalogénica entre 49 y 28 m.a. (Clark, et al., 1980) y corresponde al avance hacia el este de un arco magmático en su límite inferior (49 m.a.) y al retroceso hacia el Pacífico en el límite superior (28 m.a.) a una distancia aproximada de 650 Km de la paleotrinchera. Adicionalmente en el sur de Nayarit y adyacente al estado de Jalisco, Damon y colaboradores (1979) documentan una época de mineralización de 19 a 11 m.a.. En la Yesca, Nayarit (figura III.3), la mineralización de plata está asociada con diques basálticos andesíticos que cortan las tobas de flujo de cenizas (19 m.a.) de la Sierra Madre Occidental. Las vetas hidrotermales Au-Ag-(Pb-Zn-Cu) constituyen una franja desde los límites de los estados de Guerrero y Oaxaca, hasta los estados de Nayarit y Zacatecas.

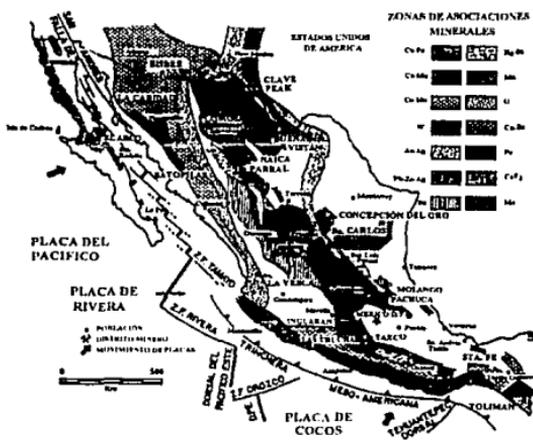


Figura III.3 Provincias metalogénicas de México (Tomado de Clark, et al., 1982; Damon y Clark, 1981)

## AMBIENTE TECTÓNICO Y MINERALIZACIÓN

La zona de vetas de fisura de Ag-Au-Pb-Zn y los yacimientos de Hg-Sb que atraviesan el arco Volcánico Transmexicano son aparentemente una continuación de cinturones similares en el norte de México (Figura III.3).

Las mineralizaciones de estaño aparecen como vetas y diseminados confinadas principalmente a riolitas en un cinturón que flanquea la margen este de la Sierra Madre Occidental de Durango a Guanajuato (Foshag y Fries, 1942). El origen del estaño es atribuido a la removilización y lixiviación de este elemento contenido en las rocas volcánicas ácidas mediante la actividad del agua meteórica calentada por anomalías térmicas (Lufkein, 1972; Pan, 1974) (Figura III.3).

Los yacimientos de fluorita forman un pequeño cinturón en la parte sureste de Chihuahua, Durango y Zacatecas (Figura III.3). Los yacimientos de mercurio-antimonio (Hg-Sb-(Mn)), con cantidades menores de manganeso, se localizan principalmente en la porción centro-oriental del estado de Guerrero y en algunas localidades del estado de Michoacán y Jalisco. La mineralización consiste en su mayor parte de cinabrio, metacínabrio, estibinita y otros arsenuros y seleniuros de mercurio y antimonio (Figura III.3).

*romb*

## CAPITULO IV

# CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

### IV.1 INTRODUCCIÓN

Constantemente se obtienen datos sobre los recursos naturales para probar hipótesis y simular o modelar el medio ambiente. Dichos datos pueden ser obtenidos por medio de métodos *in situ* o de *percepción remota*. La obtención de datos *in situ* es llevada a cabo por medio de dispositivos en contacto directo con el fenómeno de interés. Por otro lado, los métodos de percepción remota utilizan dispositivos que no se encuentran en contacto físico con el fenómeno de interés utilizando variaciones en la distribución de diferentes parámetros para la obtención de datos. Por ejemplo, los gravímetros adquieren datos sobre las variaciones en la distribución de la fuerza de gravedad, el sonar en los sistemas de navegación obtiene datos sobre las variaciones en la distribución de las ondas acústicas. Los dispositivos llamados *sensores* generalmente montados y operados en aviones o plataformas espaciales (satélites) graban usualmente la radiación electromagnética (REM).

La energía electromagnética representa de esta forma el enlace entre los sensores y el fenómeno bajo estudio localizado a distancia. Estos sensores adquieren datos sobre los rasgos de la superficie terrestre que emiten o reflejan la energía electromagnética, los cuales al ser analizados proporcionan información acerca de su textura y composición. Los métodos y técnicas que utiliza la radiación electromagnética como medio de obtención de información para el estudio de la superficie terrestre y sus recursos son agrupados bajo el término de *PERCEPCIÓN REMOTA* o *TELEDETECCIÓN* exclusivamente.

### IV.2 TIPOS DE DATOS OBTENIDOS POR MEDIO DE PERCEPCIÓN REMOTA

Para determinar que tipo de datos pueden ser obtenidos por medio de percepción remota es necesario identificar dos clases de variables. La primera de ellas corresponden a las variables que pueden ser medidas directamente por los sensores. Estas variables llamadas *biofísicas* proporcionan fundamentalmente información biológica y/o física directamente sin tener que hacer uso de datos auxiliares (p.e. el mapeo de temperatura). La Tabla IV.1 muestra una lista de nueve variables biofísicas.

**Tabla IV.1** Variables biofísicas fundamentales que pueden ser obtenidas por Percepción Remota

- 
- Localización planimétrica (x,y)
  - Topografía/Balimetría (elevación z)
  - Color (objetos)
  - Características de absorción de clorofila (vegetación)
  - Biomásas (vegetación)
  - Contenido de humedad (vegetación)
  - Contenido de humedad (suelos)
  - Temperatura
  - Textura o rugosidad
- 

El segundo grupo de variables que pueden ser obtenidos por percepción remota son las variables *híbridas* creadas por el análisis sistemático de más de una variable biofísica. Por ejemplo, con los datos de las variables biofísicas de temperatura, absorción de clorofila y contenido de humedad de la vegetación se pueden identificar tipos de vegetación o vegetación no sana. Esta variable conocida como *stress* de vegetación es una variable híbrida resultado de la combinación de tres variables biofísicas.

Para extraer información biofísica cuantitativa de los datos digitales de los sensores remotos se requiere que el analista (usuario) entienda la forma en que la radiación electromagnética interactúa con el fenómeno de interés (suelo, vegetación, rocas, etc.), el tipo de resolución inherente al sistema de sensores remotos que esté usando y la correcta aplicación de las técnicas de procesamiento digital de imágenes para la extracción de información biofísica y/o híbrida.

### IV.3 FUENTES DE ENERGÍA Y PRINCIPIOS DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Las características de la propagación de la energía en forma de radiación electromagnética desde la fuente directamente a través del espacio libre o indirectamente por reflexión o re-radiación a los sensores, la hace una valiosa fuente de datos para la interpretación de las propiedades del medio con el cual interactúa. Para esta interpretación es necesario comprender la manera en que la radiación es generada, propagada y modificada al interactuar con la materia.

#### IV.3.1 Modelo ondulatorio de Maxwell

James C. Maxwell publica en 1865 una teoría unificada y coherente de los fenómenos eléctrico y magnético aparentemente desconectados entre sí, que provee una base lógica para predecir la posible existencia de la forma dinámica de dichos fenómenos sin limitaciones de frecuencias, longitudes de onda o amplitudes con las cuales la radiación puede ocurrir. El modelo propuesto por Maxwell sostiene que la energía electromagnética es producida siempre que una carga eléctrica oscila y es acelerada. El movimiento aparente

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

de la carga es una perturbación caracterizada por la presencia de ondas eléctricas y magnéticas. Esta perturbación es llamada onda electromagnética.

La radiación electromagnética es una forma de energía que se manifiesta únicamente por su interacción con la materia, donde la velocidad de propagación depende tanto de las propiedades del material como de la frecuencia de la onda. En todos los casos la relación entre la velocidad de propagación ( $v$ ), la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $\nu$ ) es:

$$= \lambda \nu \quad (\text{IV.1})$$

Dado que la frecuencia de la onda no cambia al penetrar en el material, la longitud de onda debe por lo tanto variar conforme cambia la velocidad de propagación. Por ejemplo, la luz visible que se propaga a través de un cristal con una velocidad ( $v$ ) de aproximadamente  $c/1.5$ , será más corta en su longitud de onda, que en el espacio libre por un factor de 1.5. Este factor es llamado *índice de refracción*.

### IV.3.2 Teoría cuántica de Planck.

La teoría cuántica formulada en 1900 por Max Planck es útil para describir como la radiación electromagnética interactúa con la materia y explica ciertos fenómenos (efecto fotoeléctrico y espectros de líneas emitidos por átomos con alto contenido de energía) que no pueden ser explicados por medio del modelo de Maxwell.

Planck postula que la energía que interactúa entre la materia y la radiación electromagnética es siempre igual a un número de veces una cantidad elemental llamada *quantum*, *cuanto de energía o cuanto*, la cual es proporcional a la frecuencia de la radiación electromagnética que interviene.

Si  $E$  es el cuanto de energía y  $\nu$  la frecuencia de la radiación electromagnética se tendrá que:

$$E = h\nu \quad (\text{IV.2})$$

donde la constante de Planck ( $h$ ) tiene un valor de  $6.625 \times 10^{-34}$  Js.

Tanto el modelo ondulatorio de Maxwell de la física clásica como el modelo de Planck de la teoría cuántica, explican la naturaleza de la radiación electromagnética completándose mutuamente, a través de:

$$E = \frac{h\nu}{\lambda} \quad (\text{IV.3})$$

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

De esta ecuación se tiene que la energía del cuanto es inversamente proporcional a su longitud de onda. Por lo tanto las longitudes de onda grandes van a tener los más bajos niveles de energía, estando relacionados los más altos con las longitudes de onda más pequeñas.

### IV.3.3 Generación de la radiación electromagnética

La radiación electromagnética es generada por cambios en el tamaño o dirección de un campo eléctrico o magnético que fluctúa con el tiempo. En la naturaleza estos procesos se dan de diferentes formas relacionadas con la temperatura del cuerpo que emite la radiación. Así, todo cuerpo que esté sobre el cero absoluto (-273.15 °C) emite alguna forma de radiación donde el rango de su longitud es una función tanto de la temperatura como de la naturaleza del cuerpo. El espectro de longitud de onda y su terminología se muestra en la figura IV.1.

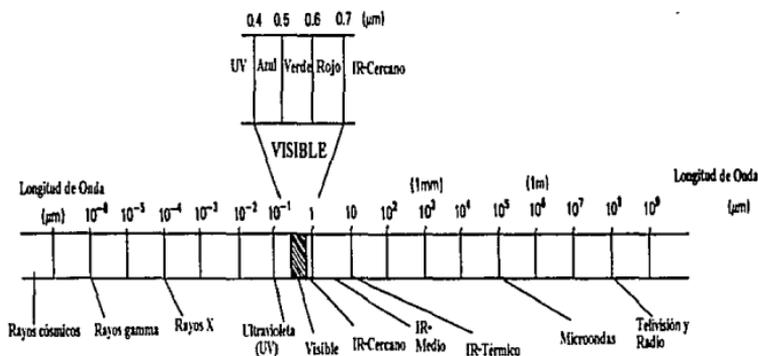


Figura IV.1 Espectro electromagnético

El total de energía emitida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta ( $T$ ) (*Ley de Stefan-Boltzmann*):

$$H = \sigma T^4 \quad (IV.4)$$

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.7 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ). La longitud de onda dominante ( $\lambda_m$ ) en micrones es dada por la *Ley de Wein* o del desplazamiento:

$$\lambda_m = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T \text{ } ^\circ\text{K}} \quad (\text{IV.5})$$

Es importante observar que al incrementarse la temperatura (T) de un cuerpo, el total de energía emitida cambia muy rápidamente llevando más energía al hacerse su longitud de onda más pequeña. La figura IV.2 muestra las curvas de energía emitida por un cuerpo a diferente temperatura, donde el total de la energía emitida por el cuerpo esta dada por el área bajo la curva.

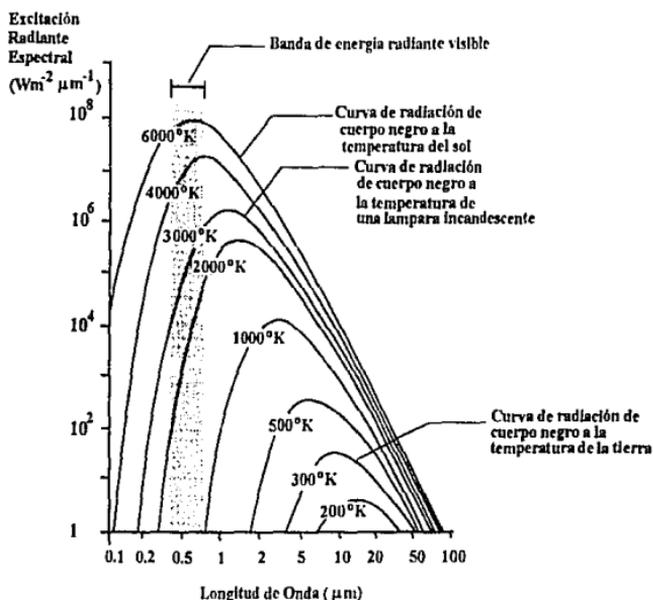


Figura IV.2 Distribución espectral de la energía radiada de varios cuerpos a diferente temperatura. El área bajo la curva representa el total de energía emitida para cada temperatura. La Ley de Stefan-Boltzmann y la Ley de Wein controlan las formas de las curvas.

## IV.4 INTERACCIONES DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA CON LA ATMÓSFERA Y LA MATERIA

La adquisición de información de los diferentes materiales que constituyen la superficie terrestre a partir de los datos de percepción remota depende de la manera en que la radiación electromagnética interactúa con la materia en un rango de longitudes de onda del espectro continuo.

### IV.4.1 Interacciones de la energía con la atmósfera

Todas las radiaciones detectadas por los sensores remotos pasan a través de algún espesor de la atmósfera, el cual puede variar ampliamente. Por ejemplo, las fotografías e imágenes espaciales pasan a través de todo el espesor de la atmósfera terrestre en comparación con las obtenidas con sensores aerotransportados que pasan a través de un espesor de la atmósfera relativamente más pequeño. Esto produce entre otras cosas un profundo efecto en la intensidad y composición espectral de las radiaciones disponibles en algunos sistemas de sensores remotos. Los efectos netos de la atmósfera varían de acuerdo al espesor de la misma que cruce la energía, la magnitud de la energía sensada, las condiciones atmosféricas y las longitudes de onda involucradas. Estos efectos son causados principalmente por los mecanismos atmosféricos de *dispersión* y *absorción*.

La *dispersión* atmosférica es una propagación impredecible en toda dirección de la radiación electromagnética por partículas en la atmósfera. La *dispersión Rayleigh* es común cuando la radiación interactúa con las moléculas atmosféricas y otras partículas que son mucho más pequeñas en diámetro que las longitudes de onda de la radiación incidente. El efecto de esta dispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda que interviene (Lillesand y Kiefer, 1987). Por lo tanto, este efecto es más fuerte en las longitudes de onda cortas que en las longitudes de onda grandes. Una manifestación de esta dispersión es el cielo azul, debido a que la luz del sol con una longitud de onda dominante más corta (azul) que las otras longitudes de onda del visible interactúa con la atmósfera. En ausencia de la dispersión el cielo parecería negro. La dispersión Rayleigh es una de las causas más frecuentes de "neblina" en las imágenes de satélite. Visualmente la neblina disminuye la claridad y/o el contraste de la imagen.

Otro tipo de dispersión es la *Mie* la cual se presenta cuando el diámetro de las partículas es esencialmente igual al de la longitud de onda captada por el sensor. El vapor de agua y el polvo son las mayores causas de la dispersión Mie. Este tipo de dispersión influye notablemente en las longitudes de onda grandes.

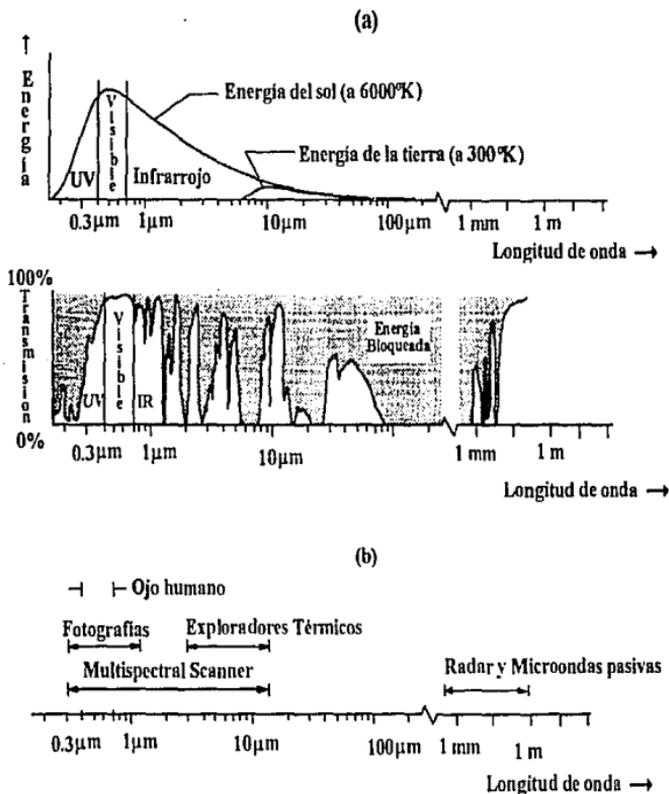
Otro fenómeno de dispersión es el conocido como dispersión *no selectiva* la cual se produce cuando el diámetro de las partículas (p.e. las gotas de agua) que causan la dispersión son mucho más grandes que las longitudes de onda de la energía detectada.

En contraste con la dispersión, la *absorción* atmosférica es el resultado de la pérdida de energía debido a los constituyentes atmosféricos. Entre los más efectivos absorbentes de la radiación solar se consideran el vapor de agua, dióxido de carbono y el ozono. Porque estos gases tienden a absorber la energía electromagnética en longitudes de

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

onda específicas influyendo en lo que es detectado espectralmente por un sistema de percepción remota. Los rangos de longitudes de onda en los cuales la atmósfera es particularmente transmisible de la energía son llamados *ventanas atmosféricas*.

La figura IV.3a muestra las interrelaciones entre las fuentes de energía y las características de absorción de la atmósfera. La figura IV.3b muestra los sistemas de percepción remota.



#### IV.4.2 Interacción de la radiación electromagnética y la materia a nivel atómico.

Una molécula puede poseer diferentes clases de energía: *energía rotacional*, en virtud de la rotación del átomo alrededor de su centro de gravedad; *energía vibracional* debida al desplazamiento periódico de los átomos de su posición de equilibrio y *energía electrónica* dado que los electrones cautivos o asociados con cada átomo están en constante movimiento; por lo que un electrón puede tener uno o varios niveles discretos de energía pudiendo pasar de un nivel a otro mediante un salto rápido que implica una cantidad de energía finita.

Cuando un electrón desciende a un nivel de menor energía la diferencia es emitida como un cuanto de energía. Si el salto es de un nivel a otro de mayor energía ésta es absorbida entre los dos niveles se generan así los espectros de emisión y absorción respectivamente. Como estos saltos implican niveles de energía discretos la cantidad de energía emitida o absorbida está definida, por lo que cada línea de un espectro representa la transición de un electrón de un estado de energía a otro.

Los elementos presentan *transiciones electrónicas, vibracionales o rotacionales*. Las *transiciones electrónicas* son aquellas que involucran cambios de un nivel de energía a otro; requiriendo de mayor energía para su excitación. Ocurren en sólidos, líquidos y gases y se presentan particularmente en los elementos de transición (Ni, Cr, Co, Fe, etc.). Las *transiciones vibracionales* son el resultado del cambio en la posición relativa de los átomos que componen una molécula. Estas transiciones se asocian a la vibración molecular y al igual que las electrónicas se presentan en los sólidos, líquidos y gases. Sin embargo, estas requieren de baja energía para su excitación. Las *transiciones rotacionales* se relacionan con el cambio en el momento de inercia de la rotación de las moléculas de gas y ocurren únicamente en estos.

#### IV.4.3 Interacción de la radiación electromagnética con la materia a nivel macroscópico

Cuando la radiación electromagnética incide sobre un material, la energía de esta puede ser transmitida, absorbida o reflejada por el material. Por lo tanto, los materiales presentan espectros de *absorción o transmisión*, producidos al interponerse el material entre la fuente de energía y el sensor, de *reflexión* cuando la fuente de energía y el sensor se encuentran del mismo lado del material y de *emisión* cuando el material es la fuente misma.

Partiendo del *principio de conservación de la energía*, el cual determina que para las interacciones de la radiación electromagnética con la materia, la energía incidente de una longitud de onda  $(E)_\lambda$  es distribuida entre la reflexión  $(ER)_\lambda$ , absorción  $(EA)_\lambda$  y la transmisión  $(ET)_\lambda$ . Esto es:

$$(EI)_{\lambda} = (ER)_{\lambda} + (EA)_{\lambda} + (ET)_{\lambda} \quad (IV.6)$$

Dividiendo la ecuación (IV.6) entre  $(EI)_{\lambda}$ , nos permite definir las propiedades macroscópicas de los materiales en términos de los cocientes  $(ER)_{\lambda}$ ,  $(EA)_{\lambda}$ ,  $(ET)_{\lambda}$  y  $(EI)_{\lambda}$ :

$$1 = \left( \frac{ER}{EI} \right)_{\lambda} + \left( \frac{EA}{EI} \right)_{\lambda} + \left( \frac{ET}{EI} \right)_{\lambda} \quad (IV.7)$$

donde  $(ER/EI)_{\lambda}$  es la reflectancia ( $\rho_{\lambda}$ ),  $(EA/EI)_{\lambda}$  es la absorción ( $\alpha_{\lambda}$ ) y  $(ET/EI)_{\lambda}$  es la transmitancia ( $\tau_{\lambda}$ ).

Dos puntos importantes relacionados con la ecuación (IV.6) son: 1) la proporción de la energía reflejada, absorbida y transmitida puede variar para los diferentes elementos que componen la superficie de la tierra dependiendo del tipo de material y condición de los mismos, lo que permite distinguir diferentes elementos en una imagen y 2) la dependencia de la longitud de onda indica que aún dentro de un elemento dado, la porción de energía reflejada, absorbida y transmitida varía para las diferentes longitudes de onda.

Las propiedades de reflectancia de los elementos de la superficie de la tierra son muy importantes, dado que muchos de los sistemas de percepción remota operan en regiones de longitud de onda en las cuales predomina la energía reflejada, por lo que es muy útil expresar la ecuación de balance (IV.6) de la forma:

$$(ER)_{\lambda} = (EI)_{\lambda} - [(EA)_{\lambda} + (ET)_{\lambda}] \quad (IV.8)$$

donde la energía reflejada es igual a la energía incidente en un elemento dado menos la energía que es absorbida o transmitida por ese elemento.

Las características de reflectancia de los elementos que componen la superficie de la tierra pueden ser cuantificados midiendo la porción de energía incidente que es reflejada. Esta energía es medida en función de la longitud de onda y es llamada *reflectancia espectral* ( $\rho_{\lambda}$ ) la cual es definida matemáticamente en la ecuación (IV.8) y expresada generalmente como un porcentaje.

La gráfica de la reflectancia espectral de un objeto en función de la longitud de onda es llamada *curva espectral de reflectancia*. La curva espectral de reflectancia nos da una idea de las características espectrales de un objeto e influye ampliamente en la selección de las regiones de longitudes de onda en las cuales los datos de percepción remota son obtenidos para una aplicación particular.

### IV.4.4 Interacción de la radiación electromagnética con suelo, rocas y vegetación

En los estudios geológicos las interacciones de la radiación electromagnética tanto con el suelo y las rocas son de suma importancia. Sin embargo, la interacción de la radiación electromagnética y la vegetación son también importantes, porque áreas extensas de la superficie están cubiertas por la vegetación la cual oscurece la respuesta espectral de los otros materiales que componen la superficie.

#### IV.4.4.1 Interacción con rocas y minerales

Los espectros de reflectancia y emitancia característicos de las rocas y minerales en las diferentes regiones del espectro electromagnético son el resultado de sus propiedades físicas y químicas.

En las interacciones de los minerales con la radiación electromagnética se presentan tanto transiciones electrónicas (campo de cristal y cargas de transferencia) como vibracionales (armónicos y combinación de tonos).

Las transiciones electrónicas dentro de los átomos requieren de más energía que las transiciones vibracionales en las moléculas. Las primeras caracterizan las longitudes de onda cortas (visible) y las últimas predominan en las longitudes de onda grandes (infrarrojos). Sin embargo, existen algunos traslapes entre los rangos de estos dos procesos fundamentales.

#### *Transiciones Electrónicas*

Los iones en los cristales adquieren propiedades individuales especiales en cada compuesto dependiendo del tipo, número y arreglo de los iones circundantes. Los arreglos en poliedros usados en los modelos de las estructuras cristalinas son considerados una entidad espectroscópica. En estos poliedros se puede distinguir un ion metálico central y iones negativos directamente enlazados con él en los vértices, conocidos como iones de ligando o simplemente ligando (ligandos). Los ligandos son considerados cargas puntuales que crean potenciales electrostáticos, los cuales son llamados *campos cristalinos* o *campos de cristal*. Estos potenciales causan la separación de los electrones de los niveles de energía *d* y *f* del ion metálico central (figura IV.4). La principal característica de los campos de cristal es su simetría y la distancia entre éstos y el ion central, quedando su intensidad determinada por el tipo de ligando.

La figura IV.5 muestra los rasgos espectrales debido a efectos de campos de cristal de tres minerales los cuales contienen iones ferricos. Las áreas sombreadas muestran el rango de longitud de onda de las bandas espectrales afectadas por los campos de cristal y las líneas verticales el mínimo de cada una de las bandas.

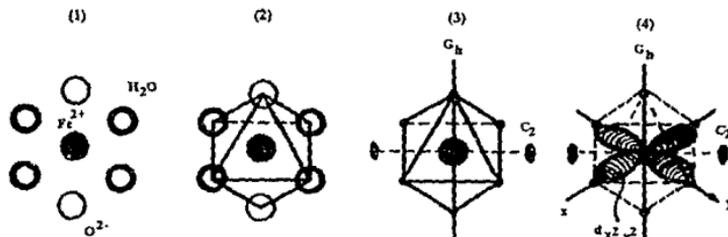


Figura IV.4 Origen del modelo de campo de cristal: 1) Una porción de la estructura cristalina de la Vivianita  $Fe^{2+}$  en seis pliegues coordinados de  $4H_2O$  y  $2O^{2-}$  (p.e.  $Fe^2(H_2O)_4O_2$ ); 2) el mismo ejemplo en forma de poliedro (octaedro deformado); 3) Los ligandos (dos de oxígeno y cuatro moléculas de  $H_2O$ ) son sustituidos por cargas puntuales creando un campo cristalino (eléctrico) en el  $Fe^{2+}$  con  $C_{2h}$  de simetría y 4) Ion central del metal de transición representado por los orbitales atómicos  $d_{x^2-y^2}$  describiendo el estado de los electrones en el campo  $C_{2h}$ .

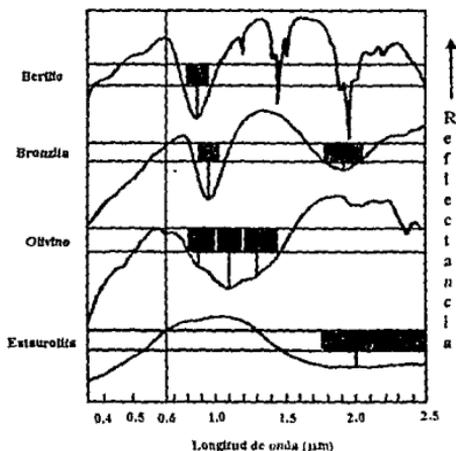


Figura IV.5 Espectro de cuatro minerales los cuales contienen iones ferrosos con efectos de campo de cristal localizados en diferente lugar (en negro).

Otro tipo de transición electrónica por medio de los cuales la energía absorbida causa una migración de electrones entre iones cercanos o iones y ligandos, son las *cargas*

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

de transferencia, resultado de la presencia en el ion metálico de electrones con suficiente energía que no se encuentran fuertemente unidos a éste y que pueden así pasar de un ion a otro.

La más común de las cargas de transferencia involucra la transferencia de electrones entre el hierro y el oxígeno, lo que da origen a la banda de transferencia Fe-O en las longitudes de onda próximas a  $0.55 \mu\text{m}$ . Los rasgos presentes en el espectro de la limonita ( $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) se deben al extremo de la banda de transferencia Fe-O (figura IV.6). En el espectro de la augita  $\{(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+}, \text{Ti},\text{Al})_2 (\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6\}$  (figura IV.6), los rasgos son debidos a transiciones de carga de transferencia entre los iones ferroso y férrico, en tanto que los rasgos en el espectro de la carnotita  $[\text{K}_2(\text{UFO}_2)_2 (\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$  presentan un mínimo de tres transiciones de carga de transferencia entre los átomos de oxígeno y uranio (McGlynn, 1961) (figura IV.6).

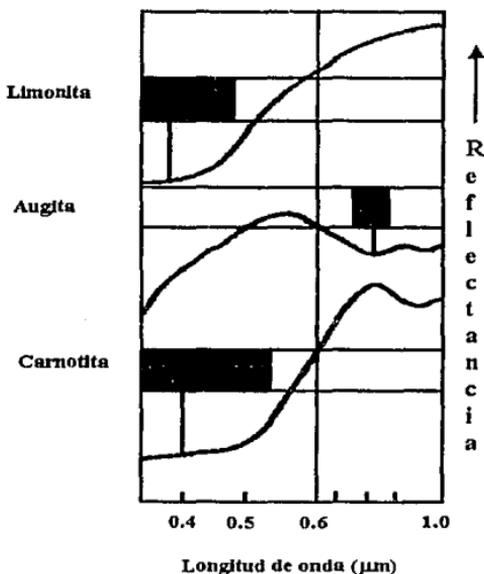


Figura IV.6 Espectro de minerales generado por cargas de transferencia.

*Transiciones vibracionales*

Los movimientos vibracionales aparentemente al azar de algunos sistemas son provocados por un número limitado de movimientos simples llamados *modos fundamentales*<sup>1</sup>, que para un sistema de  $N$  partículas serán  $3N-6$ .

Cuando un modo fundamental es excitado por dos o más cuantos de energía ocurre un *armónico* o *sobretono*, produciendo una banda de aproximadamente dos veces (o algún valor múltiplo entero de) la frecuencia fundamental, por ejemplo,  $2\nu_1$ ,  $3\nu_1$ , etc. Si dos o más vibraciones fundamentales o armónicos diferentes se combinan ocurre una *combinación de tonos*, cercano a la suma de todas las frecuencias fundamentales o armónicos implicados.

De la parte visible hasta el infrarrojo cercano del espectro electromagnético, las transiciones vibracionales en los minerales más importantes están relacionados con los iones hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) o moléculas de agua.

Las moléculas de agua tienen tres modos fundamentales o modos normales (figura IV.7): la tensión simétrica  $\text{OH}$  ( $\nu_1$ ); la flexión simétrica  $\text{OHO}$  ( $\nu_2$ ) y la tensión asimétrica  $\text{HO}$  ( $\nu_3$ ). Cuando estos modos son excitados se presentan rasgos característicos en  $2.738 \mu\text{m}$ ,  $6.269 \mu\text{m}$  y  $2.648 \mu\text{m}$ . Los armónicos y combinaciones que pueden presentarse en el infrarrojo cercano están dados por: ( $\nu_2+\nu_3$ ) a  $1.875\mu\text{m}$ ; ( $2\nu_1+\nu_3$ ) alrededor de  $1.454 \mu\text{m}$ ; ( $\nu_1+\nu_3$ ) a  $1.38 \mu\text{m}$ ; ( $\nu_2+\nu_3+\nu_1$ ) próximo a  $1.135 \mu\text{m}$  y ( $2\nu_1+\nu_3$ ) en  $0.942 \mu\text{m}$ .

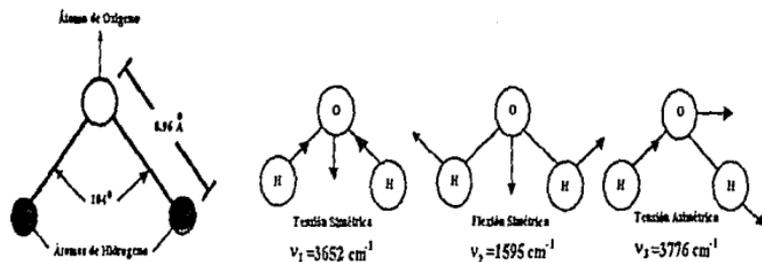


Figura IV.7 Modos fundamentales o modos normales de las moléculas de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Los rasgos espectrales de los minerales debido a la presencia de agua se ilustran en la figura IV.8. En estos espectros los rasgos varían en intensidad y posición; no obstante, siempre se localizan dos rasgos característicos en  $1.4 \mu\text{m}$  y  $1.9 \mu\text{m}$  cuando las moléculas de agua están presentes en los minerales y rocas.

<sup>1</sup> Es el movimiento molecular en el cual todos los átomos se mueven con una misma frecuencia.

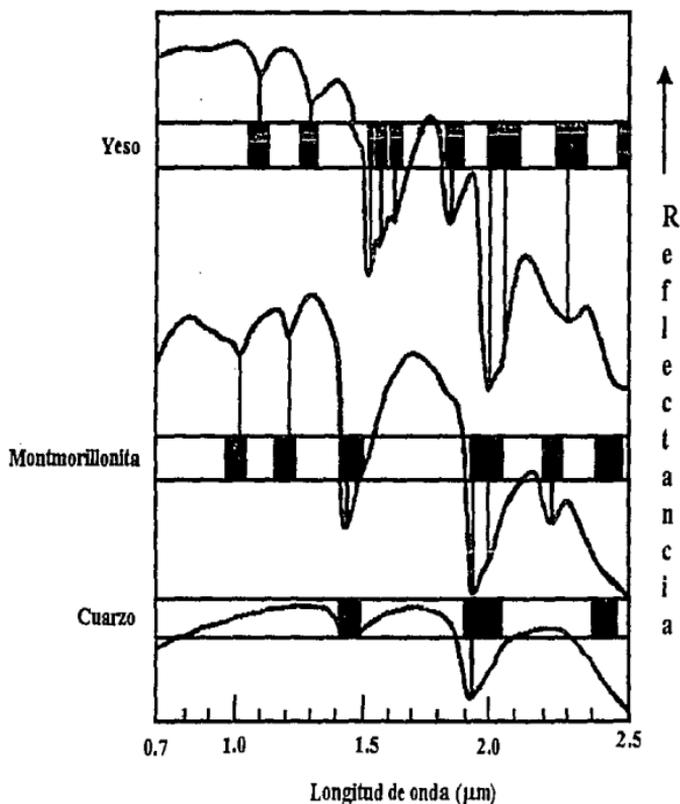


Figura IV.8 Rasgos espectrales debido a combinaciones vibracionales y sobretonos de moléculas de agua contenidas en los minerales.

En los hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) hay únicamente un modo de tensión activo en el infrarrojo, el cual produce rasgos cerca de los 2.75  $\mu\text{m}$ . Los rasgos que se observan en el infrarrojo cercano son producidos por el primer armónico de la tensión ( $\text{OH}$ )

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

(probablemente responsable de la mayoría de los rasgos comunes de todas las bandas cercanas a 1.4  $\mu\text{m}$ ), o combinaciones de banda de la tensión fundamental con una reflexión fundamental X-OH (donde X es usualmente Al o Mg). Rasgos ocasionados por OH ocurren en el espectro de las micas, minerales arcillosos y anfíboles (figura IV.9).

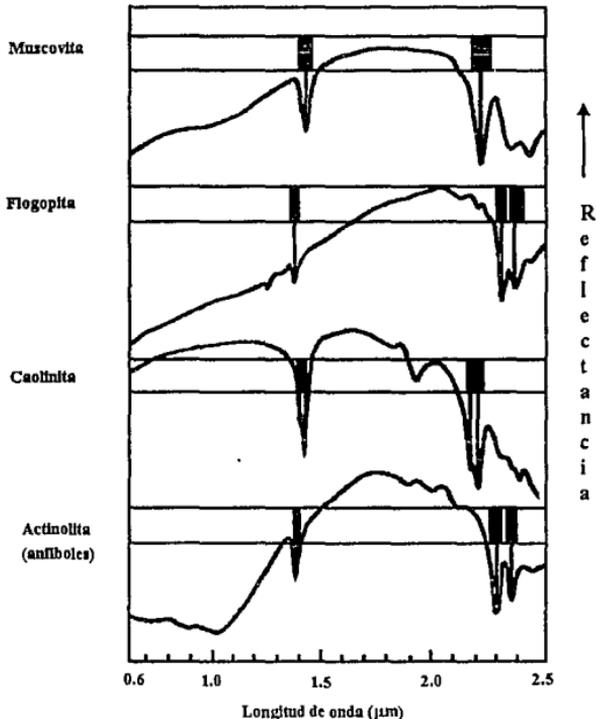


Figura IV.9 Rasgos espectrales debido a sobretonos y combinación de tonos del grupo hidroxilo presente en diferentes minerales.

Los rasgos de la muscovita  $[\text{K}_2\text{Al}_4(\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20})(\text{OHF}_4)]$ , que aparecen cerca de 2.2  $\mu\text{m}$  son atribuidos a la combinación de la tensión OH con la flexión fundamental

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

AlOH. La combinación de la tensión OH con el modo de flexión MgOH se muestra en el espectro de la flogopita  $[K_2(Mg,Fe^{2+})_6(Si_6Al_2O_{20})(OH,F)_4]$ , donde ocurre próximo a 2.3  $\mu m$  y se repite en los espectros de la caolinita  $[Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8]$  y la actinolita  $[Ca_2Mg_5(Si_8O_{22})(OH,F)_2]$ .

En el espectro de la caolinita los rasgos dobles indican que el grupo OH está localizado en diferentes sitios. Otros rasgos en este espectro pueden ser debidos a combinaciones de la tensión OH con la tensión fundamental silicón-oxígeno. La presencia del rasgo cerca de 1.9  $\mu m$  indica la presencia de  $H_2O$ .

Los rasgos espectrales de las rocas se derivan tanto de procesos electrónicos como vibratoriales y más que un rasgo producido por un mineral en particular una roca produce un espectro resultado de la combinación de los diferentes rasgos característicos de los minerales que constituyen la roca. Sin embargo, dado que la intensidad de los rasgos espectrales varía de mineral a mineral normalmente pero no necesariamente el rasgo característico del mineral con mayor concentración dominará en el espectro de la roca.

### IV.4.4.2 Interacción con la vegetación.

Los rasgos de absorción en el espectro de reflectancia de la vegetación de 0.45 a 0.68  $\mu m$  (figura IV.10) son el resultado de la clorofila; en tanto los rasgos de reflectancia de 0.52 a 0.68  $\mu m$  indican la parte del espectro visible que no es absorbida intensamente, lo que da como resultado la apariencia verde de la vegetación. Por encima de ciertas temperatura las hojas presentan una alta reflexión en el infrarrojo cercano llamada *meseta* que es característica de los tejidos sanos de las hojas. La pendiente pronunciada en la curva entre el rasgo de absorción de la clorofila en 0.68  $\mu m$  y la meseta del infrarrojo cercano es llamada *límite rojo* (Holder, et al. 1980, 1983) y su inclinación se relaciona con las concentraciones de clorofila en las hojas (Holder, 1983). La reflectancia entre 1.6 y 2.2  $\mu m$  indica el contenido de agua de las hojas y el agua presente en ellas hace que absorban energía alrededor de 1.4  $\mu m$  y 1.9  $\mu m$ .

Las diferentes estructuras de las hojas, proporción de clorofila, contenido de agua y la morfología de la superficie de las diferentes plantas tienen un marcado efecto en las propiedades espectrales en el visible e infrarrojo cercano. Asimismo, las plantas al ser un conjunto de hojas, espacios, ramas y algunas veces ramificaciones con formas y tamaños diferentes de hojas (área fotosintética), van a tener interacciones individuales que pueden interferir y ampliar el rango de la respuesta espectral; lo que dificulta la discriminación tanto de especies como de los miembros sanos o atrofiados dentro de las mismas.

Las variaciones en el contenido de clorofila en los diferentes ciclos de vida de estos organismos hacen que sus propiedades espectrales no sean fijas. Los cambios que ocurren en la pendiente y posición del límite rojo reflejan los cambios en las concentraciones de clorofila dentro de las hojas. La información concerniente a la etapa fenológica y/o estado de salud son los aspectos más importantes para la detección del *stress* en la vegetación (Labovitz, et al, 1983) y en las investigaciones geobotánicas (Rock, 1982).

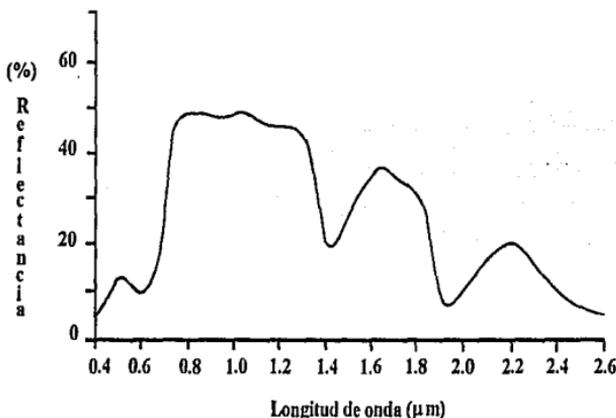


Figura IV.10 Curva espectral de reflectancia característica de la vegetación

#### IV.4.4 Firma espectral o patrones de respuesta espectral

La medición de la respuesta espectral de los sensores remotos en diferentes materiales permite algunas veces una evaluación de los tipos y/o condiciones de los mismos. Esta respuesta es llamada *firma espectral*.

Las mediciones físicas de la radiación de materiales específicos del terreno en diferentes longitudes de onda son también llamadas firmas espectrales. Muchos de los materiales del terreno manifiestan características de reflectancia o emitancia muy distintivos. Estas características dan como resultado *patrones de respuesta espectral* más que firmas espectrales. La razón para lo anterior es que el término *firma* implica un patrón que es absoluto y único, lo cual no es el caso de los patrones observados en las respuestas espectrales medidas por los sensores remotos que pueden ser cuantitativos pero no absolutos y distintivos pero no necesariamente únicos.

#### IV.5 ADQUISICIÓN DE DATOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

La detección de la energía electromagnética puede ser realizada tanto *fotográficamente* como *electrónicamente*.

Los procesos fotográficos usan reacciones químicas en la superficie de una película sensible a la luz para detectar las variaciones de energía dentro de una escena. Los sensores electrónicos generan una señal eléctrica que corresponde a las variaciones de la escena original. Aunque considerablemente más complejos y caros que los sistemas

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

fotográficos, los sensores electrónicos ofrecen las ventajas de un amplio rango espectral, la habilidad de transmitir los datos adquiridos electrónicamente y la de mejorar la calibración.

Las señales eléctricas del sensor son generalmente grabadas en cintas magnéticas. Subsecuentemente estas señales pueden ser convertidas en una imagen (el término imagen es usado para designar la representación pictórica de los datos recabados por el sensor), la cual puede ser desplegada en una pantalla de televisión y/o monitor de computadora o bien en película fotográfica. En este caso la película fotográfica es solamente un medio de grabación.

### IV.5.1 Características de las imágenes digitales de los sistemas de percepción remota

Las imágenes de percepción remota son una función  $f(x,y)$ , que es discretizada tanto en coordenadas espaciales como en valores de brillantez. Podemos considerar que una imagen de percepción remota es una matriz en la que los índices de los renglones y columnas identifican un punto en la imagen y los correspondientes valores de la matriz identifican los niveles de gris o valor de brillantez en ese punto. Los elementos de estos arreglos digitales son llamados *elementos de la imagen*, *picture elements*, *pixels* o *pels*, estos dos últimos términos son abreviaciones de *picture elements*. Su principal característica es el rango de longitud de onda que representan.

Generalmente, los valores de brillantez o niveles de gris son grabados dentro de los rangos numéricos de 0 a 63, 0 a 127, 0 a 255, 0 a 511 o de 0 a 1023. Estos valores representan un juego de números enteros que pueden ser grabados usando 6, 7, 8, 9 y 10 bits del código binario usado por las computadoras, respectivamente (esto es  $2^6=64$ ,  $2^7=128$ ,  $2^8=256$ ,  $2^9=512$  y  $2^{10}=1024$ ). En tales formatos las imágenes pueden ser fácilmente analizadas con la ayuda de una computadora.

Algunas imágenes son mediciones de la distribución espacial de la radiación solar reflejada en los rangos de longitudes de onda del ultravioleta, visible e infrarrojo cercano y medio. Otras son medidas de la distribución espacial de la energía emitida por la tierra misma y otras (particularmente en la región de las microondas) miden el regreso relativo de la energía transmitida por el satélite desde la superficie de la tierra. Sistemas de este último tipo son llamados *sistemas activos* dado que la fuente de energía es provista por el sistema, en comparación con las mediciones que dependen de una fuente externa de energía (como el sol), conocidos como *sistemas pasivos*.

La *resolución* es la medida de la habilidad de un sistema óptico para distinguir entre señales que son espacialmente cercanas o espectralmente similares (Swain y Davis, 1978). La habilidad para medir una variable biofísica usando percepción remota requiere considerar cuatro tipos de resolución: *resolución espectral*, *espacial*, *radiométrica* y *temporal*.

La *resolución espectral* se refiere a la dimensión y número de intervalos de longitudes de onda del espectro electromagnético para los cuales el sensor es sensible. El

tamaño de las bandas o intervalos puede ser grande (grueso) como en las fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro (0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ) o relativamente pequeños (fino) como la banda 3 del Landsat 5 Thematic Mapper (0.63 a 0.69  $\mu\text{m}$ ). En el primer caso, el sensor graba todo el flujo radiante reflejado en el azul, verde y rojo incidente en él. En el segundo caso el sensor graba únicamente un rango muy específico del flujo radiante del rojo. Las bandas en los sensores son normalmente seleccionadas para maximizar el contraste entre los elementos de interés y su fondo. Una buena selección de las bandas espectrales hace posible que un elemento pueda ser detectado e identificado a partir de la extracción de información biofísica.

Existe una relación entre el tamaño de un elemento a ser identificado y la resolución espacial de los sistemas de percepción remota. La *resolución espacial* es una medida de la separación lineal y angular entre dos elementos que pueden ser detectados por el sensor (Swain y Davis, 1978). La resolución espacial de las fotografías aéreas es normalmente medida como el número de líneas pares obtenidas por milímetro en una imagen. En los sistemas de sensores remotos ésta es simplemente el tamaño del pixel en metros equivalentes del terreno proyectado en el campo instantáneo de vista (IFOV) del sensor. Por ejemplo, la resolución espacial de terreno del Landsat Multispectral Scanner (MSS) es aproximadamente  $79 \times 79$  m. Una regla muy útil para la detección de un elemento es que la resolución espacial del sistema sensor deberá ser menor que la mitad del tamaño del elemento medido en su dimensión más pequeña.

La *resolución temporal* de un sistema sensor se refiere al intervalo de tiempo em que el sensor toma una imagen de una área en particular. Idealmente un sensor obtiene datos repetitivamente con el fin de determinar las características distintivas del fenómeno de interés. Las cosechas por lo general tienen un calendario único en cada región geográfica (Jensen y Chery, 1980); por lo tanto el análisis de las imágenes de diferente fecha proporcionan información de cómo las variables específicas de la cosecha cambian con el tiempo.

La sensibilidad de un sensor para diferenciar la intensidad de una señal grabada del flujo radiante reflejado o emitido desde el terreno es llamada *resolución radiométrica*. Esta define el número de niveles discriminables de la señal, por lo que es un parámetro significativo en la identificación de elementos en una escena. El sensor Thematic Mapper en los Landsat 4 y 5 graba los datos del flujo radiante en 8 bits (valores de 0 a 255) con una resolución espacial de  $30 \times 30$  m en seis de sus siete bandas en comparación con el sensor Multispectral Scanner en los Landsat 1 al 5 que grababan en 6 bits y expandidos en tres de sus bandas a 7 bits (0 a 127). Así, el primer sensor tiene una mejor resolución tanto espacial como radiométrica.

El tamaño de la imagen (en kilómetros equivalentes del terreno), la resolución radiométrica, espacial y espectral determinan el volumen de datos proporcionados por el sensor. Por lo tanto el mejoramiento en la resolución radiométrica, espacial y espectral usualmente requiere una capacidad adicional de memoria para el procesamiento de los datos, tanto para la interpretación como para el análisis por medio de la computadora.

#### IV.5.2 Los sistemas de sensores remotos Landsat

En el presente trabajo se presentan dos sistemas que proporcionan una extensa colección de datos para las investigaciones de los recursos naturales de la tierra. Estos son el *Multispectral Scanner (MSS)* y el *Thematic Mapper (TM)* del programa LANDSAT.

En 1967, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) inicia el programa Earth Resources Technology Satellite (ERTS) para el estudio de los recursos naturales desde el espacio. El satélite ERTS-1 lanzado el 23 de julio de 1972 fue el primer sistema experimental diseñado para probar la factibilidad de obtener datos acerca de los recursos naturales por medio de satélites. Anterior al lanzamiento del ERTS-B el 22 de enero de 1975, la NASA renombró el programa ERTS como LANDSAT para distinguirlo del futuro programa del satélite oceanográfico SEASAT (lanzado el 26 de junio de 1978). Renombrando a la vez el ERTS-1 como LANDSAT 1 y el ERTS-B como LANDSAT 2. El LANDSAT 3 fue lanzado el 5 de marzo de 1978; el LANDSAT 4 el 16 de julio de 1982 y el LANDSAT 5 el 1 de marzo de 1984.

La Tabla IV.2 destaca las características de los satélites Landsat del 1 al 5. En ella se puede observar que tres diferentes tipos de sensores han sido combinados en estos satélites. Estos son el sistema de cámaras *Return Beam Vidicon (RBV)* y los sistemas *Multispectral Scanner (MSS)* y *Thematic Mapper (TM)*.

Tabla IV.2 Características de los satélites de la serie LANDSAT

Satélite	Fecha de Lanzamiento	Puesto fuera de servicio	Bandas RBV	Bandas MSS	Bandas TM	Órbita
Landsat-1	Julio 23, 1972	Enero 6, 1978	1, 2, 3 (imágenes simultáneas)	4, 5, 6, 7	Ninguna	18 días 900 Km.
Landsat-2	Enc. 22, 1975	Feb. 25, 1982	1, 2, 3 (imágenes simultáneas)	4, 5, 6, 7	Ninguna	18 días 900 Km.
Landsat-3	Mar. 5, 1978	Mar. 31 1983	A, B, C, D (imagen lado por lado una banda)	4, 5, 6, 7, 8 <sup>a</sup>	Ninguna	18 días 900 Km.
Landsat-4	Julio 16, 1982	-----	Ninguno	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	16 días 705 Km.
Landsat-5	Mar. 1, 1984	-----	Ninguno	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	16 días 705 Km.

<sup>a</sup>Banda 8 (10.4-12.6  $\mu\text{m}$ ) dejó de funcionar poco tiempo después del lanzamiento

La Tabla IV.3 resume la resolución espectral y espacial de cada uno de estos sistemas. Dado que el Landsat 1, 2 y 3 son similares en su operación como lo son los Landsat 4 y 5 la discusión de estos dos sistemas se hace en dos grupos diferentes.

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

**Tabla IV.3 Resolución espacial y espectral de los sensores usados en las misiones Landsat 1 al 5**

Sensor	Misión	Sensibilidad ( $\mu\text{m}$ )	Resolución (m)
RBV	1, 2	0.475 - 0.575	80
		0.580 - 0.680	80
		0.690 - 0.750	80
	3	0.505 - 0.750	30
MSS	1 - 5	0.5 - 0.6	79/82 <sup>a</sup>
		0.6 - 0.7	79/82
		0.7 - 0.8	78/82
		0.8 - 1.1	79/82
	3	10.4 - 12.6 <sup>b</sup>	240
TM	4, 5	0.45 - 0.52	30
		0.52 - 0.60	30
		0.63 - 0.69	30
		0.76 - 0.90	30
		1.55 - 1.75	30
		10.4 - 12.5	120
	2.08 - 2.35	30	

<sup>a</sup>79 m Landsat 1 al 3 y 82 m para el Landsat 4 y 5

<sup>b</sup>dejo de funcionar poco tiempo después del lanzamiento (banda 8 del Landsat 3)

### IV.5.2.1 Característica y sensores a bordo de los sistemas Landsat 1, 2 y 3

Los Satélites Landsat del 1 al 3 fueron lanzados en una órbita circular alrededor de la tierra a una altura nominal de aproximadamente 919 Km (la altitud variaba entre 880 y 940 Km). El satélite orbitaba la tierra una vez cada 103 minutos, lo que resultaba en 14 órbitas por día con una inclinación orbital de 99°. Esto hacía que pasará muy cerca de los polos y que cruzará el ecuador con un ángulo de aproximadamente 9° desde la normal. Esta órbita sincrónica con el sol hacía que el plano orbital sobre la tierra tuviera la misma proporción angular con la cual la tierra se mueve sobre el sol. Estas características hacen que el satélite cruce el ecuador aproximadamente a la misma hora local (9:30 a 10:00 A.M.) sobre el lado iluminado de la tierra. La velocidad del satélite era de alrededor de 6.46 Km/s.

Los Landsat 1, 2 y 3 fueron lanzados con dos sistemas de sensores idénticos a bordo: el sistema de tres canales Return Beam Vidicon (RBV) y el sistema Multispectral Scanner de cuatro canales

#### *Sistema Return Beam Vidicon (RBV)*

El sistema RBV consistía de tres cámaras de televisión que enfocaban la misma área (185 x 185 Km) del terreno simultáneamente. La resolución espacial de las cámaras era de alrededor de 80 m y la resolución espectral de cada cámara de: 0.475 a 0.575  $\mu\text{m}$  (verde), 0.580 a 0.680  $\mu\text{m}$  (rojo) y de 0.690 a 0.830  $\mu\text{m}$  (infrarrojo cercano). Estas bandas fueron designadas como banda 1, 2 y 3. El sistema RBV no contenía película, pero en su lugar sus imágenes eran expuestas por un dispositivo cerrado y almacenadas en una superficie foto sensitiva dentro de cada cámara. Esta superficie era entonces transformada a

formato raster<sup>2</sup> por un rayo de electrones interno para producir una señal de video como una cámara de televisión convencional. Sin embargo, este sistema estuvo plagado de problemas técnicos.

### Sistema Multispectral Scanner (MSS)

El sistema MSS fue el primer sistema de monitoreo global capaz de producir datos multiespectrales en un formato digital. Las ventajas en el procesamiento de los datos MSS por computadora condujeron a amplias aplicaciones de los Landsat 1, 2 y 3. Cerca de diez billones de kilómetros cuadrados de la superficie de la tierra (únicos en tiempo pero repetitivos en área) fueron tomados por los sistemas MSS a bordo de estos satélites.

El sistema Multispectral Scanner (MSS) fue emplazado en cada uno de los cinco satélites Landsat. El arreglo de los multidetectores del MSS y su sistema de exploración se muestra en la figura IV.11. El espejo explorador oscila a través de un desplazamiento angular de  $\pm 2.89^\circ$ . El ángulo de incidencia es aproximadamente igual al ángulo de reflexión, el haz de exploración es de  $11^\circ$ . Esto da como resultado una línea de 185 Km de ancho para cada órbita. Detectores paralelos sensibles a cuatro rangos espectrales del espectro electromagnético ven simultáneamente el terreno: 0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$  (verde), 0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$  (rojo), 0.7 a 0.8  $\mu\text{m}$  (infrarrojo cercano) y de 0.8 a 1.1  $\mu\text{m}$  (infrarrojo). Estas bandas fueron designadas como 4, 5, 6 y 7 porque el sistema RBV incluía las bandas 1, 2 y 3.

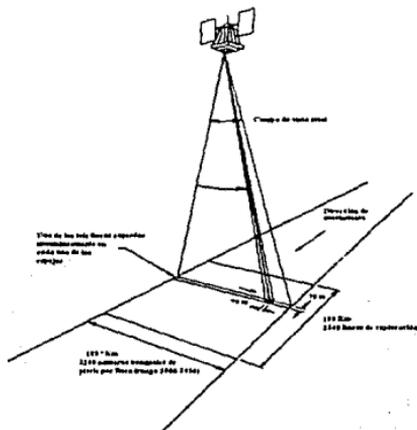


Figura IV.11 Componentes del Sistema Multispectral Scanner (MSS) en los Satélites Landsat 1, 2, 3, 4 y 5.

<sup>2</sup> Área iluminada de los Sistemas de Tubos de Rayos Catódicos

El campo instantáneo de vista (IFOV) de cada detector es cuadrado con una resolución de  $79 \times 79$  m. La señal de voltaje de cada detector es transformada a un valor digital por medio de un convertidor analógico-digital, usando el rango de valores de brillantez o números digitales de 0 a 63. Estos datos son escalados a otros rangos durante procesos subsecuentes (normalmente las bandas 4-6 son escaladas a un rango de 0 a 127 y la banda 7 es escalada de 0 a 63).

El convertidor analógico-digital muestrea la salida del detector alrededor de 100,000 veces en un segundo dando un espaciamiento nominal del terreno de 56 m entre lecturas. De este espaciamiento los valores de la imagen forman una matriz de pixels de  $56 \times 79$  m. (como se muestra en la figura IV.12). Sin embargo, los valores de brillantez para cada pixel son derivados de toda la resolución de  $79 \times 79$  m del terreno (área sombreada en la figura IV.12).

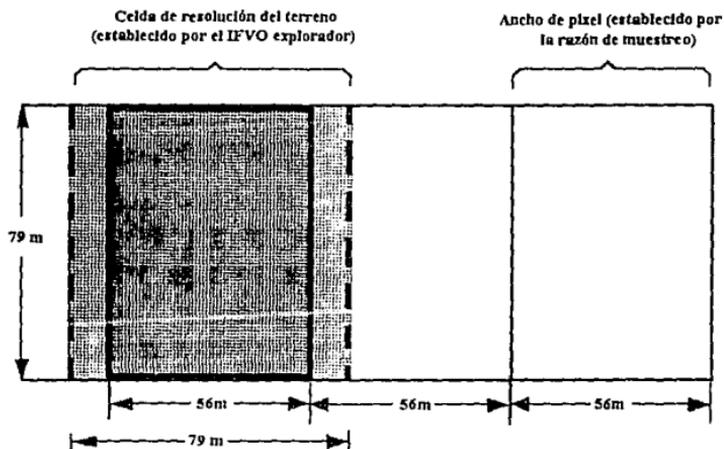


Figura IV.12 Resolución del terreno entre el campo de vista original de  $79 \times 79$  m del MSS y la razón de muestreo (Tomada de: EROS Data Center, Sioux Fall, S.D.).

El MSS explora cada línea de oeste a este con un movimiento hacia el sur del satélite que provee la progresión a lo largo de la línea explorada. Cada escena MSS se forma con los datos continuos que cubren aproximadamente un área del terreno de  $185 \times 185$  Km con un 10 por ciento de traslape entre escenas sucesivas. Una escena nominal consiste de 2340 líneas de exploración, con alrededor de 3240 pixels por línea o alrededor de 7,581,600 pixels por canal. Con cuatro observaciones espectrales por pixel, cada imagen contiene alrededor de 30 millones de observaciones o valores.

#### **IV.5.2 Característica y sensores a bordo de los sistemas Landsat 4 y 5**

Los Landsat 4 y 5, como sus predecesores fueron lanzados dentro de una órbita repetitiva, circular, sincrónica con el sol y cerca de los polos. Sin embargo, estas órbitas fueron bajadas de 900 a 705 Km de altura para hacer a los satélites potencialmente recuperables y también para ayudar a mejorar la resolución espacial de los sensores a bordo.

Las órbitas del Landsat 4 y 5 tienen un ángulo de inclinación de 98.2º con respecto al ecuador. El satélite cruza el ecuador de norte a sur a las 9:45 A.M. tiempo local. Cada órbita toma aproximadamente 99 minutos, acompletando 14.5 órbitas en un día. Debido a la rotación de la tierra, la distancia entre las proyecciones del terreno para órbitas consecutivas es de aproximadamente 2752 Km en el ecuador repitiendo un ciclo cada 16 días.

Los satélites Landsat 4 y 5 incluyen tanto el Sistema Multispectral Scanner (MSS) como el Sistema Thematic Mapper (TM).

El sistema MSS a bordo de los Landsat 4 y 5 es esencialmente idéntico a los sensores MSS de los satélites Landsat anteriores. El ancho de 185 Km de la proyección en tierra se ha mantenido en la órbita de baja altitud incrementando el total del campo de vista (de 11.56º en los sistemas anteriores) a 14.92º. La óptica del sistema MSS ha sido también modificada para producir un campo instantáneo de vista de 82×82 m para que corresponda esencialmente a los 79×79 de los sistemas anteriores. Las mismas cuatro bandas son usadas para la obtención de datos pero han sido reenumeradas por lo que las bandas 1 a la 4 de los Landsat 4 y 5 corresponden directamente a las bandas de la 4 a la 7 de los sistemas MSS anteriores.

#### ***Sistema Thematic Mapper (TM)***

El primer sistema sensor Thematic Mapper (TM) fue lanzado el 16 de julio de 1982 y el segundo el 1 de marzo de 1984. El TM es un sistema mecánico-óptico de exploración que graba la energía emitida y reflejada en las regiones del visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo térmico del espectro electromagnético. Este sistema obtiene imágenes multispectrales con una mayor resolución espacial, espectral y radiométrica que las imágenes del Sistema MSS. La configuración del Sistema TM se muestra en la figura IV.13.

Las mejoras espectrales incluyen la adquisición de datos en siete bandas. Los detectores para las bandas en el visible e infrarrojo cercano (1 a 4) son cuatro arreglos lineales escalonados que contienen 16 celdas de silicón cada uno. Los dos detectores del infrarrojo medio con 16 celdas de indio-antimonio en un arreglo escalonado y el detector de infrarrojo térmico un arreglo de cuatro elementos con celdas de mercurio-cadmio-telurio.

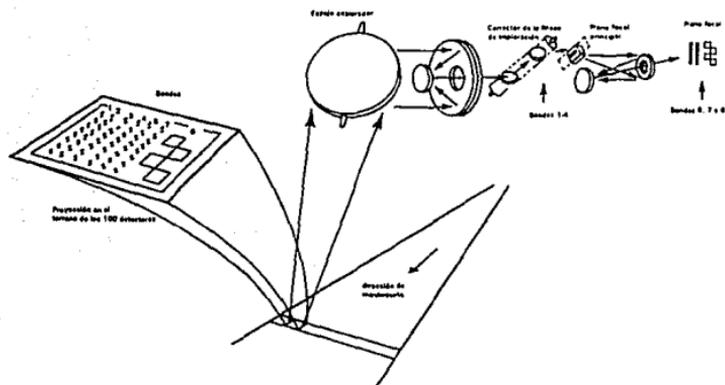


Figura IV.13 Camino óptico y proyección del IFOV de los detectores Thematic Mapper en la superficie de la tierra.

Las bandas espectrales del TM representan importantes diferencias en comparación con las bandas del MSS tradicional. El ancho de las bandas en el MSS fue seleccionado con base en la utilidad para un inventario general de la vegetación y estudios geológicos generales. A la inversa, la mayoría de las bandas en el TM fueron seleccionadas después de años de análisis en la discriminación del tipo y vigor de la vegetación y mediciones de la humedad del suelo, diferenciación de nubes y nieve e identificación de alteración en ciertos tipos de rocas. La Tabla IV.4 lista las siete bandas espectrales del TM, con un breve resumen de las principales aplicaciones de cada una.

Radiométricamente, el TM realiza la conversión analógica-digital sobre un rango de cuantificación de 256 números digitales (8 bits). Esto corresponde a un incremento de cuatro veces el rango de la escala de gris relativa a los 64 números digitales (6 bits) que es usado por el MSS.

Geométricamente, los datos TM son recabados usando un campo instantáneo de vista (IFOV) de  $30 \times 30$  m (para todas las bandas excepto la banda térmica la cual tiene un IFOV de  $120 \times 120$  m). Esto representa un decremento en las dimensiones lineales del IFOV de aproximadamente 2.6 veces o una reducción en el área del IFOV de aproximadamente 7 veces. Al mismo tiempo, algunos cambios en el diseño han sido incorporados dentro del TM para mejorar la precisión del posicionamiento geodésico de los datos.

Mientras que el MSS recaba datos en un sola dirección (W-E) a lo largo de una línea de exploración, el TM adquiere datos tanto en dirección W-E como E-W. Este procedimiento de exploración bidimensional es empleado para reducir la oscilación del

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

espejo explorador y para incrementar el tiempo de un detector individual sobre una porción dada del terreno dentro del IFOV. El TM explora un campo de vista total de 15.4° y completa aproximadamente siete ciclos de combinaciones en dirección W-E y E-W por segundo.

Otra mejora del TM en comparación con el MSS es el número de detectores usados por sus diferentes bandas. Mientras el MSS emplea seis detectores para la grabación de datos en cada una de sus cuatro bandas (24 detectores en total), el TM usa 16 detectores para cada una de sus bandas exceptuando la banda térmica que utiliza solo 4 detectores (100 detectores en total). Esto es, 16 líneas de datos para cada banda no térmica y 4 líneas para la banda térmica son obtenidas en cada barrida del espejo explorador. En un instante de tiempo, todos los detectores ven una área diferente en el terreno debido a la separación individual de los detectores dentro de los dos planos focales del TM (figura IV.13). Las bandas de la 1 a la 4 están localizadas en el primer plano focal y de la 5 a la 7 en el segundo plano focal.

**Tabla IV.4 Características de las bandas espectrales del Landsat-TM**

Banda	Longitud de onda (µm)	Localización espectral nominal	Principal aplicación
1	0.45 - 0.52	azul	Diseñada para la penetración de cuerpos de agua, útil para el mapeo de aguas de costa. También es útil para el mapeo de suelo/vegetación, mapeo de tipos de bosques e identificación de rasgos culturales
2	0.52 - 0.60	verde	Diseñada para medir la reflectancia de la vegetación para su discriminación y la evaluación del vigor. También es útil para la identificación de rasgos culturales.
3	0.63 - 0.69	rojo	Diseñada para percibir una región de absorción de clorofila auxiliando en la diferenciación de especies de plantas, también es útil para la delimitación entre fronteras de suelos y fronteras geológicas y la identificación de rasgos culturales. Esta banda muestra más contraste que las bandas 1 y 2 debido a que se reduce el efecto de atenuación atmosférica
4	0.76 - 0.90	infrarrojo cercano	Útil para la determinación de los tipos de vegetación, vigor y contenido de biomasa, para delinear cuerpos de agua y para la discriminación de humedad del suelo.
5	1.55 - 1.75	infrarrojo medio	Indicativa de la humedad de la vegetación, también es útil para diferenciación de nieve, nubes, hielo e investigaciones hidrologías
6 <sup>a</sup>	10.4 - 12.5	infrarrojo térmico	Útil en el análisis de stress de vegetación, discriminación de humedad del suelo y aplicaciones de mapeo térmico.
7 <sup>a</sup>	2.08 - 2.35	infrarrojo medio	Útil para la discriminación de minerales y tipos de rocas (particularmente efectiva en la identificación de zonas con alteración hidrotermal de rocas). También es sensible al contenido de humedad de la vegetación.

<sup>a</sup> Las bandas 6 y 7 están fuera de secuencia de las longitudes de onda porque la banda 7 fue añadida al TM después de diseñado el sistema.

## CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

Un *ángulo monitor de exploración* en el espejo de exploración genera señales indicando la posición angular del espejo como una función del tiempo. Estas señales son llamadas datos de corrección del espejo explorador y son transmitidos a tierra para su incorporación dentro del procesamiento geométrico de los datos de la imagen TM. Las señales del ángulo monitor de exploración son también usadas para guiar los movimientos de la *línea correctora de exploración* localizada en la parte frontal del primer plano focal (figura IV.13). La función del ángulo corrector de exploración es ilustrada en la figura IV.14.

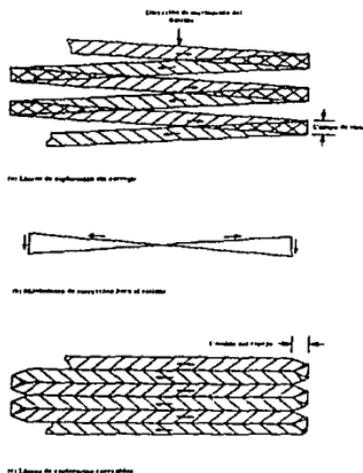


Figura IV.14 Proceso esquemático de la línea correctora de exploración del Sistema TM

El TM también emplea una fuente de calibración interna consistente en tres lámparas de filamentos de tungsteno, un cuerpo negro para la banda térmica y un obturador montado en un pivote. El obturador pasa a través del campo visual de los detectores cada vez que el espejo explorador cambia de dirección, permitiendo que la luz de las lámparas pase directamente dentro del campo visual de las bandas no térmicas. Un espejo en el obturador pasa directamente la energía de la fuente de calibración térmica dentro del campo visual de los detectores de la banda térmica. Estas fuentes de calibración son usadas para monitorear la respuesta radiométrica de los diferentes detectores a lo largo de la vida útil del sensor.

## IV.6 FORMATO DE LAS IMÁGENES DIGITALES OBTENIDAS POR LOS SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

Una vez descrita la forma cómo son adquiridos los datos por los sensores de los sistemas MSS y TM de los satélites Landsat, es importante identificar algunos de los formatos más frecuentemente usados para almacenarlos. Estos formatos incluyen: *banda secuencial* (BSQ), *banda intercalada por línea* (BIL), *banda intercalada por pixel* (BIP) y *descodificación de longitud de corrida* (Run-Length). Cada uno de estos formatos es usualmente precedido por información de encabezado y/o de "cola", que consisten de datos auxiliares acerca de la fecha, altitud del sensor, posición, ángulo del sol, etc. Tal información es útil cuando los datos son corregidos radiométricamente o geoméricamente. Los datos son grabados normalmente en cintas compatibles para computadora (CCT) de nueve-pistas con una densidad de datos de 800, 1600 o 6250 bit por pulgada (bpi). Ahora en cintas de 8 mm o en CD-ROM.

### *Formato de Banda Intercalado por Línea (BIL)*

En este formato los datos para las bandas son escritas línea por línea en la misma cinta (p.e. línea 1 banda 1, línea 1 banda 2, línea 1 banda 3, ..., línea 1 banda n, línea 2 banda 1, etc.). Este formato es muy útil cuando todas las bandas van a ser usadas en el análisis. Si algunas de las bandas no son de interés, el formato es ineficiente porque se tendrían que leer los datos en serie no deseados. El formato de cinta BIL se muestra en la figura IV.15.

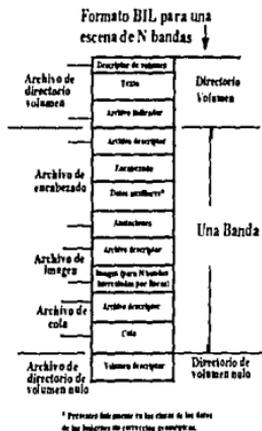


Figura IV.15 Formato para una banda intercalada por línea (BIL) para una cinta Landsat

### Formato de Banda Secuencial (BSQ)

El formato de banda secuencial es el más utilizado por los usuarios porque todos los datos de una banda que cubre la escena entera son escritos en un sólo archivo. De esta manera, no es necesario leer la información en "serie" de las bandas que no son de utilidad en el análisis para la solución del problema. El formato para una cinta típica BSQ es resumido en la figura IV.16.

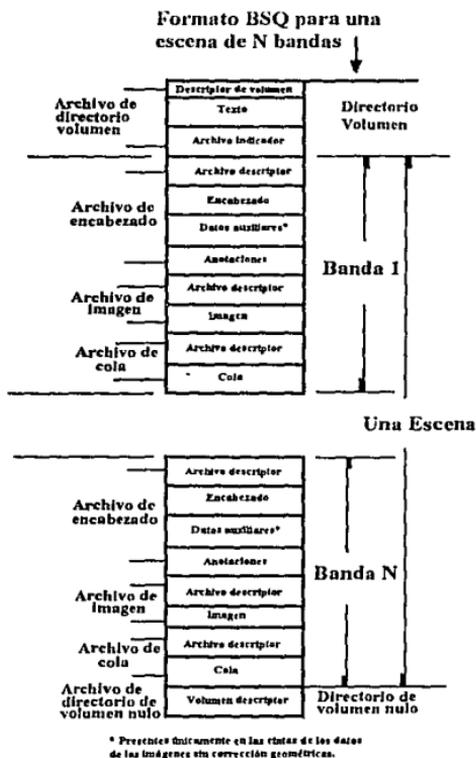


Figura IV.16 Formato de banda secuencial (BSQ) para una cinta Landsat

### ***Formato de Banda Intercalado por Pixel (BIP)***

Todo elemento de la matriz tiene  $n$  valores de pixel (uno para cada banda espectral) seguido uno del otro [p.e. pixel (1,1) banda 1, pixel (1,1) banda 2, pixel (1,1) banda 3, ... , pixel (1,1) banda  $n$ , etc.]. Este también es un formato práctico si todas las bandas son usadas en el análisis.

### ***Formato de Longitud de Corrida (Run-Length)***

Este es una estructura de datos tomada de la teoría cartográfica que conserva espacio en memoria (Monmonier, 1982). El formato de longitud de corrida es un formato de banda secuencial que guarda tanto los valores de brillantez como el número de veces que estos valores se presentan a lo largo de una línea de exploración. Por ejemplo, si en un cuerpo de agua se presentaran valores de brillantez de 10 para 60 pixels a lo largo de una línea, estos pueden ser almacenados en la computadora en un formato entero (213) como 060010. Esto significa que los siguientes 60 pixels pueden cada uno tener un valor de brillantez de 10. Lógicamente, almacenar dos valores (60 y 10) requiere mucho menos memoria en disco o en cinta, que almacenar 60 números diez veces. Sin embargo, si los datos son excepcionalmente heterogéneos y con muy pocos valores de brillantez similares, este formato no es mejor que otros.

—

## CAPITULO V

# PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

## V.1 INTRODUCCIÓN

¿Por qué procesar digitalmente una imagen de percepción remota? o ¿por qué intentar imitar o mejorar la capacidad del ser humano para interpretar imágenes producidas por ciertos dispositivos de percepción remota? son las preguntas que con mayor frecuencia se hacen los usuarios de dichas imágenes. Primero, un analista por lo general solo puede discriminar únicamente entre 8 y 16 tonos de gris cuando analiza una fotografía aérea en tonos continuos de blanco y negro. Las imágenes digitales son grabadas en 256 tonos de gris, por lo tanto éstas contienen más información que la que el analista puede extraer visualmente. Además, las interpretaciones obtenidas por medio del procesamiento digital pueden ser reproducidas por otros analistas lo que no sucede con las interpretaciones obtenidas por un analista que es generalmente única. También por medio del procesamiento digital se puede extraer una gran cantidad de información cuantitativa, como las características espectrales de los materiales presentes en la escena que cubre la imagen. Lo anterior no quiere decir que el procesamiento digital de imágenes sea superior al análisis visual (fotointerpretación) de la imagen. Más bien hay veces que un enfoque digital se adapta mejor a la solución del problema bajo estudio.

El procesamiento para la manipulación e interpretación de imágenes digitales con la ayuda de computadoras como actualmente se conoce tiene sus inicios en los años 60's con las imágenes de la luna transmitidas por el Ranger 7 y procesadas para corregir las distorsiones causadas por el dispositivo con el que fueron adquiridas. También se realizó un número limitado de investigaciones con datos multispectrales obtenidos por dispositivos a bordo de aviones o de fotografías aéreas digitalizadas. En estos años no solo la teoría y uso del procesamiento digital de imágenes estaban poco desarrollados sino que también el costo de los equipos de cómputo y software eficiente era muy elevado. Hoy en día la variedad en las fuentes de imágenes digitales, los avances en el campo de la computación y el desarrollo que han tenido las técnicas de procesamiento digital han hecho que las imágenes digitales sean usadas en una amplia variedad de campos de estudio. Si bien muchas veces estos campos no están relacionados presentan una parte en común: la necesidad de analizar y extraer información de una imagen digital para su análisis. La extracción de información de las imágenes digitales requiere que el usuario evalúe lo siguiente: 1) definir la naturaleza del problema e identificar los objetivos y métodos necesarios para aceptar o rechazar la hipótesis o las hipótesis sobre el fenómeno de estudio. Si el uso de las técnicas del procesamiento digital para la solución del problema se justifica el analista deberá; 2) evaluar las diferentes alternativas de adquisición de datos de acuerdo a los objetivos del

estudio. Por ejemplo, digitalizar fotografías aéreas ya existentes o adquirir los datos en un formato digital (p.e. imágenes Landsat) y 3) al asumir que el análisis se llevará en forma digital se deberá adquirir o tener un sistema de procesamiento de imágenes apropiado.

### V.2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El procesamiento digital de imágenes es extremadamente amplio e involucra algunas veces procesos matemáticos complejos. Sin embargo, la idea fundamental del procesamiento digital es esencialmente simple y consiste en suministrar a la computadora un pixel a la vez. La computadora inserta estos pixels en una ecuación o en una serie de ecuaciones, almacenando los resultados obtenidos con los cuales forma una nueva imagen. Dicha imagen puede ser desplegada y/o grabada en un formato gráfico o ser manipulada por procesos adicionales.

Las posibles formas de manipulación de una imagen pueden ser agrupadas dentro de uno o más de los siguientes cuatro grupos de operaciones: (Lillesand y Kiefer, 1987)

1. *Rectificación y restauración de imágenes.* Estas operaciones ayudan a corregir los datos degradados o distorsionados de la imagen para una mejor representación de la misma. La rectificación y restauración de imágenes son llamadas algunas veces *operaciones de preprocesamiento*.

2. *Realce de imágenes.* Estas operaciones son aplicadas a las imágenes para hacer más efectivo su despliegue y grabación para su posterior análisis visual. Normalmente, el realce de imágenes involucra técnicas que incrementan las diferencias visuales entre los elementos que componen la escena para facilitar su interpretación visual.

3. *Clasificación de imágenes.* El objetivo de estas operaciones es remplazar el análisis visual de las imágenes con técnicas cuantitativas para automatizar la identificación de los elementos que componen la escena. Estas técnicas normalmente involucran el análisis de los datos de las imágenes multispectrales y la aplicación de estadísticas basadas en reglas de decisión.

4. *Combinación de diferentes tipo de datos.* Estas operaciones son usadas para combinar los datos de las imágenes con otro tipo de datos referenciados geográficamente para la misma área. Frecuentemente, se combinan datos de las imágenes de percepción remota con otras fuentes de información (p.e datos topográficos, magnéticos, gravimétricos, etc.) en el contexto de los llamados *Sistemas Geográficos de Información (SGI)*.

### **V.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES**

Quando se trabaja o se selecciona un sistema de procesamiento de imágenes se consideran los siguientes factores: el número de usuarios que tendrán acceso al sistema, el modo de operación, la unidad de procesamiento central (CPU), el sistema operativo y tipo de compiladores, la cantidad y tipo de memoria requerida, la resolución de despliegue y de color deseados y el paquete de procesamiento de imágenes.

#### ***Número de usuarios y modo de operación***

El modo de operación del sistema de procesamiento de imágenes está estrechamente relacionado al número de usuarios que van a tener acceso al sistema. Estos deben de tener una relación de uno a uno con las computadoras o estaciones de trabajo existentes, lo cual sería el caso ideal si el procesamiento de la imagen tiene lugar en un ambiente interactivo donde el analista pueda ver rápidamente los resultados del procesamiento.

#### ***Unidad de Procesamiento Central, coprocesador matemático y Memoria de Acceso Aleatorio***

El procesamiento digital de una imagen requiere de un gran número de operaciones matemáticas, las cuales se realizan en la *Unidad de Procesamiento Central (CPU)*. Específicamente el CPU se encarga de los cálculos numéricos y la entrada/salida a los dispositivos periféricos (monitores, impresoras, etc). Para aumentar la velocidad de los cálculos numéricos se usan coprocesadores matemáticos que trabajan en conjunto con el CPU. Estos arreglos (CPU más coprocesador) realizan operaciones aritméticas a una velocidad muy alta, lo cual es especialmente útil en el procesamiento de la imagen.

El CPU además deberá de contar con suficiente Memoria de Acceso Aleatorio (RAM) para la operación del sistema operativo, el software de procesamiento de imágenes y los datos de los sensores remotos que pueden estar en la memoria cuando los cálculos son realizados.

#### ***Capacidad de memoria (Mass Storage)***

Las imágenes digitales son registros geométricos arreglados en forma matricial en diferentes bandas espectrales, generalmente almacenadas con un formato de banda secuencial (BSQ) (Ver Sección IV.6.1). Cada pixel es representado por 8 bits en la computadora por lo que son requeridos 262,000 bytes de memoria para almacenar un sola banda de una imagen de 512x512 pixels. Sin embargo, para analizar una imagen con varias bandas (p.e. imágenes Landsat Thematic Mapper que contiene siete bandas individuales para cada área geográfica) es necesario más de 1 Mb de memoria para hacer accesibles las diferentes bandas de la imagen al CPU aún para áreas pequeñas.

### ***Resolución de despliegue***

Los principales medios de despliegue usados en los sistemas de procesamiento de imágenes son: los sistemas de Tubos de Rayos Catódicos (TRC) y los sistemas de televisión.

En los sistemas TRC la posición vertical y horizontal de cada pixel de la imagen es convertida a voltaje, el cual es usado para desviar los rayos de electrones; esto provee el manejo en dos dimensiones para producir una imagen. Para cada punto desviado, la intensidad del rayo es modulada utilizando un voltaje proporcional al valor del pixel en el arreglo matricial, variando con una intensidad de cero para los puntos con valores de salida correspondientes al negro y un valor máximo de 255 para los puntos correspondientes al blanco. Los sistemas de TRC pueden proporcionar una resolución de despliegue que va desde los 256x256 pixels o más (p.e. 512x512 o 1024x1024 pixels).

Los sistemas de televisión convierten una imagen a video, la cual puede ser desplegada en un monitor de televisión. La ventaja de estos sistemas es que el despliegue presenta tonalidades muy parecidas a las fotografías, las cuales son fácilmente asimiladas por el sistema visual humano. Sin embargo, este tipo de sistema presenta el problema de proveer el medio de memoria necesario para proporcionar los datos con una velocidad de alrededor de 30 cuadros por segundo para evitar el "parpadeo" del monitor.

### ***Resolución de color***

La *resolución de color* se refiere al número de tonos de la escala de gris y/o de color (p.e. 256) que pueden ser desplegados en un sistema TRC de una paleta de colores disponibles (p.e. 16.7 millones de colores).

La razón de que el despliegue y análisis de las imágenes de sensores remotos requiera de una resolución de color muy grande es que el analista debe desplegar algunas veces combinaciones en color de las bandas individuales de la imagen. Estas combinaciones son llamadas *composiciones de color*. Por ejemplo, el despliegue de una composición en color de tres imágenes de 8 bits del Landsat Thematic Mapper requiere de  $2^{24}$  colores. Sin embargo, por lo general 4096 colores cuidadosamente seleccionados de una paleta muy grande parece ser el mínimo aceptable para la creación de imágenes digitales en color. Los 4096 colores proporcionan 12 bits de color con 4 bits disponibles para cada uno de los planos azul, verde y rojo de la composición de color. Para otras aplicaciones del procesamiento digital de imágenes (p.e. despliegue de imágenes en blanco y negro, cortes de densidades de color, clasificaciones, etc.) este número de colores es adecuado.

### ***Paquetes de procesamientos de imágenes***

Los paquetes de procesamiento de imágenes son programas interactivos que residen en el disco duro en forma de módulos ejecutables. Las técnicas de procesamiento de imágenes típicamente ejecutadas por estos paquetes son resumidos en la Tabla V.1.

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Tabla V.1 Técnicas de procesamiento digital presentes en la mayoría de los softwares de procesamiento de imágenes digitales

---

<b>PREPROCESAMIENTO</b>	
A.	Corrección Radiométrica
B.	Corrección Geométrica
<b>DESPLIEGUE Y REALCE</b>	
C.	Despliegue Blanco y negro
D.	Despliegue en Color
E.	Segmentación
F.	Reducción y Amplificación de Imágenes
G.	Transectos
H.	Contrastes de Realce (Contrast Stretch)
I.	Álgebra de Imágenes
J.	Filtrado Espacial
K.	Realce de Bordes
L.	Análisis de Componentes Principales
M.	Combinaciones Lineales
N.	Transformación de Textura
O.	Transformada de Fourier
<b>EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TEMÁTICA</b>	
P.	Clasificación Supervisada
Q.	Clasificación No Supervisada
R.	Clasificación Contextual
S.	Incorporación de datos de Sistemas Geográficos de Información (GIS)
<b>SISTEMAS GEOGRÁFICOS DE INFORMACIÓN (GIS)</b>	
T.	GIS basado en raster o imagen
U.	GIS basado en Vector o Polígono
V.	Sistema de Procesamiento de Imágenes Completo (funciones de A a S)
W.	Sistema de Procesamiento de Imágenes Completo y GIS (Funciones de A a S y de T a U)
Y.	Mainframe Sistema de Comunicación para microcomputadoras o minicomputadoras

---

### V.4 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE PERCEPCIÓN REMOTA

El procesamiento digital de una imagen se inicia con el despliegue en pantalla y el cálculo de las estadísticas univariadas y multivariadas de los datos de la imagen multispectral sin procesar para tener una idea de la calidad de los mismos. Con base en estas observaciones las imágenes serán preprocesadas (en caso necesario), para reducir las distorsiones producidas por el medio ambiente y/o los dispositivos usados en su adquisición. Este preprocesamiento involucra tanto correcciones radiométricas como geométricas.

Una vez realizado el preprocesamiento (en caso de que este haya sido necesario) se aplica a la imagen diversas técnicas de realce tanto espacial como espectral para su análisis visual o para utilizarla como datos de entrada en otros procesos para la extracción de información temática (p.e. mapas litológicos).

### V.4.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico de las imágenes digitales incluye generalmente la obtención de las estadísticas univariadas (valor máximo y mínimo, la media, varianza y desviación estandar de cada una de las bandas que componen la imagen multispectral) y multivariadas (matriz de varianza-covarianza y matriz de correlación), además de la frecuencia de los valores de brillantez para la obtención del histograma de cada una de las bandas.

Como un ejemplo para la comprensión de los procesos de obtención de las estadísticas univariadas y multivariadas de las imágenes digitales, se realizó el cálculo de éstas sobre un juego de datos consistente de los primeros cinco pixels de las bandas TM1, TM4, TM5 y TM7 de la imagen Ceboruco (Tabla V.2).

Los resultados de las estadísticas univariadas de los datos de la Tabla V.2 son mostrados en la Tabla V.3

Tabla V.2 Juego de datos de valores de brillantez de los cinco primeros pixels de cuatro bandas de la imagen Ceboruco.

PIXEL	TM1	TM4	TM5	TM7
(1,1)	94	61	91	35
(1,2)	80	66	87	35
(1,3)	79	66	69	26
(1,4)	72	68	71	28
(1,5)	74	70	93	37

Tabla V.3 Estadísticas univariadas para el juego de datos de la Tabla V.2.

BANDA	TM1	TM4	TM5	TM7
Media ( $\mu_k$ )	79	66.2	82.6	32.2
DS ( $S_k$ )	8.89	3.35	11.37	4.87
Varianza ( $Var_k$ )	79	11.2	129.2	23.7
Máximo	94	70	93	37
Mínimo	72	61	69	26

La media, desviación estándar y varianza son mediciones útiles de la tendencia de los datos. Sin embargo, no proporcionan información conciente a la dependencia o independencia de los mismos. La relación de dependencia o independencia entre los datos de una banda y otra está dada por la *covarianza*. La covarianza es la medida de como dos variables cambian una en relación a la otra alrededor de una media común a ellas y se calcula a partir de la suma de cuadrados, llamada *suma corregida de productos* por medio de la siguiente ecuación (Jensen, 1986):

$$SP_{ij} = \sum_{i=1}^n (VB_{ik} \times VB_{ij}) - \frac{\sum_{i=1}^n VB_{ik} \sum_{i=1}^n VB_{ij}}{n} \quad (V.1)$$

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

donde  $VB_{ik}$  es la  $i$ -ésima medición de la banda  $k$  y  $VB_{il}$  es la  $i$ -ésima medición de la banda  $l$  con  $n$  pixels cada una,  $SP_{kl}$  es la *suma corregida de productos* y la cantidad  $\sum_{i=1}^n (VB_{ik} \times VB_{il})$  es la *suma de productos no corregida*. Para calcular la *suma de cuadrados* (SC) se hace  $k=l$  en la ecuación V.1 con lo que tendremos:

$$SP_{kk} = \sum_{i=1}^n VB_{ik}^2 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n VB_{ik} \right]^2}{n} = SC'_k \quad (V.2)$$

Dividiendo las ecuaciones V.1 y V.2 entre  $(n-1)$  obtendremos la covarianza y la varianza respectivamente. La suma de productos (SP) y la suma de cuadrados (SC) fueron calculadas para todas las combinaciones de las bandas espectrales de la Tabla V.2 y los resultados fueron arreglados en una matriz de covarianza-varianza (Tabla V.4). Todos los elementos de la matriz se repiten a excepción de los contenidos en la diagonal principal. Por ejemplo  $Cov_{12}=Cov_{21}$  y en general  $Cov_{kl}=Cov_{lk}$ . La Tabla V.5 resume el cálculo manual de la covarianza entre las bandas TM5 y TM7.

Tabla V.4 Matriz de Varianza-Covarianza de los datos espectrales de la tabla V.2

	TM1	TM4	TM5	TM7
TM1	79	-27.25	53.5	18.75
TM4	-27.25	11.2	-5.8	-10.8
TM5	53.50	-5.8	129.2	54.7
TM7	18.75	-10.8	54.7	23.7

Tabla V.5 Cálculo de la covarianza entre las bandas TM5 y TM7

TM5	TM5 x TM7	TM7
91	3,185	35
87	3,045	35
69	1,794	26
71	1,988	28
93	3,441	37
411	13,453	161

$$SP_{57} = 13,453 - \frac{(411 \times 161)}{5} = 218.8$$

$$Cov_{57} = \frac{218.8}{4} = 54.7$$

Para estimar el grado de correlación entre las bandas se usa el *Coefficiente de correlación (r)* (Cooley y Lohnes, 1971), el cual se obtiene como el cociente de la covarianza de las dos bandas entre el producto de sus desviaciones estándar, esto es:

$$r_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{S_i S_j} \quad (V.3)$$

La covarianza puede ser igual pero no puede ser mayor al valor del producto de las desviaciones estándar de estas variables. Por lo tanto, el rango de correlación es de -1 a +1. Un coeficiente de correlación de +1 representa una correlación perfecta entre las dos bandas; y un coeficiente de correlación de -1 indica que una banda se correlaciona inversamente con la otra. Un coeficiente de correlación cero indica que no existe una relación lineal entre las dos bandas. La Tabla V.6 muestra en forma de matriz la correlación de las bandas usadas en nuestro ejemplo. Usualmente, únicamente los datos debajo de la diagonal principal son mostrados, porque los términos de la diagonal son 1.0 y los términos sobre la diagonal son redundantes.

Tabla V.6 Matriz de correlación de las bandas de la tabla V.2

	TM1	TM4	TM5	TM7
TM1	-----			
TM4	-0.91	-----		
TM5	0.52	-0.15	-----	
TM7	0.43	-0.66	0.99	-----

De la matriz de correlación (Tabla V.6) se observa que los valores de brillantez de la banda TM1 están inversamente relacionados con los valores de brillantez de la banda TM4, es decir cuando los valores de brillantez de la banda TM1 se incrementan los valores de brillantez de la banda TM4 decrecen en valor. Además, las bandas TM5 y TM7 están muy correlacionadas lo que quiere decir que cuando los pixels de la banda TM5 incrementan su valor, los valores de la banda TM7 también se incrementan en una forma sistemática. Inversamente, la baja correlación de la banda TM1 con las bandas TM5 y TM7 sugiere que la banda TM1 contiene algún tipo de información no contenidas en estas bandas.

## V.4.2 Histogramas

Las imágenes de percepción remota son una representación espacial en dos dimensiones de la interacción de radiación electromagnética con la superficie de la tierra. Esta energía está expresada como valores de brillantez que son representados en tonos de gris. Puesto que cada uno de los pixels que componen la imagen está representado por su valor de brillantez, se puede construir una gráfica de la frecuencia de ocurrencia de cada valor de brillantez contra el rango de valores de brillantez disponible (generalmente de  $2^6$  o  $2^8$ ). El rango de valores de brillantez se presenta en las abscisas, mientras que la frecuencia de ocurrencia de cada uno de estos valores en las ordenadas. A esta gráfica se le llama *histograma de la imagen*.

Los histogramas son representaciones gráficas del contenido de información de la imagen y de la calidad de los datos originales. Por ejemplo, a partir del histograma se puede ver si la imagen tiene bajo o alto contraste o si los datos son de naturaleza multimodal. Un punto importante es que el histograma también puede ser visto como una distribución discreta de probabilidad, dado que la altura relativa de una barra en particular indica la probabilidad de encontrar un pixel con ese valor de brillantez en alguna parte de la imagen. Esta medición es llamada *función de densidad de probabilidad* y se representa como un histograma acumulativo, donde la frecuencia acumulada de los pixels con un valor de brillantez particular es graficada contra el rango de valores de brillantez utilizado. Cada una de las frecuencias acumuladas para los valores de brillantez es obtenida a partir de la suma de la frecuencia de todos los valores de brillantez menores que él. Por ejemplo, para un valor de brillantez de 128, la frecuencia acumulada será  $f_{128} + f_{127} + f_{126} + \dots + f_0$ .

Además de los histogramas unidimensionales (de una sola banda) existen los histogramas multidimensionales. El más simple de ellos es el de dos dimensiones llamado *dispersograma* el cual es una representación gráfica de los valores de brillantez de una banda contra los valores de otra; mostrando el grado de correlación entre las dos bandas e identificando casos donde la superficie tiene diferente respuesta espectral para cada una de las bandas. Los datos con una correlación muy alta presentan una forma cercana a un elipse a  $45^\circ$  en el dispersograma. En tanto que los datos poco correlacionados aparecen como cúmulos de puntos sin forma alguna. La importancia de estos histogramas multidimensionales radica en que son la base para la clasificación de los materiales contenidos dentro de una imagen o para la obtención de análisis multivariados.

### V.4.3 Preprocesamiento

Los sistemas de percepción remota ideales o perfectos para el estudio de la tierra y sus recursos aún no han sido desarrollados, sobre todo debido a la complejidad del terreno, que no permite que sea grabado con fidelidad por los sensores remotos. Consecuentemente, se acarrean errores en los procesos de adquisición de los datos los cuales degradan la calidad de los mismos. Estos errores pueden tener un impacto importante en el análisis subsecuente de la imagen.

Para corregir los datos de la imagen, se deben determinar tanto los errores internos como los externos. Los errores internos son originados por el sensor mismo y generalmente son sistemáticos (predecibles) y estacionarios (constantes). Estos errores pueden ser determinados antes del lanzamiento del satélite, o bien con las mediciones de calibración de los sensores una vez en órbita. Los errores externos, son debidos a perturbaciones del satélite y a variaciones en las características de la escena captada, por lo tanto son de naturaleza variable. Tales errores no son sistemáticos y se pueden determinar relacionando puntos en el terreno (p.e. puntos de control) con las mediciones del sistema sensor. Los errores radiométricos y geométricos son los tipos de errores internos y externos más comunes encontrados en las imágenes.

### Errores radiométricos

Los errores radiométricos que pueden originarse en los sensores incluyen el abandono de líneas, bandeamiento (striping) y/o saltos de líneas.

Si alguna de las celdas que componen el sensor falla durante la exploración, resulta un valor de brillantez de cero para todo pixel  $j$  en una línea  $i$ . Esto es llamado *abandono de línea* y aparece como una línea completamente negra en de la imagen. Para corregir este tipo de errores se introduce un valor de brillantez para cada una de las líneas de abandono. El *bandeamiento* se origina cuando una celda no falla de forma continua sino que proporciona lecturas más grandes que las otras celdas para la misma banda. Los datos son válidos pero deben ser corregidos (o restaurados) para tener el mismo contraste con los datos de las otras celdas. Para corregir estos errores primero se identifican en la imagen las líneas mal detectadas, lo cual se realiza generalmente calculando el histograma de los valores para cada una de las  $n$  celdas del sensor sobre una área homogénea (p.e. un cuerpo de agua). Si la media o mediana de un detector es significativamente diferente a la de las otras celdas, es probable que la celda este descalibrado requiriendo de una corrección de la tendencia (suma o sustracción) ó alguna corrección de la ganancia (multiplicación) de los valores de brillantez.

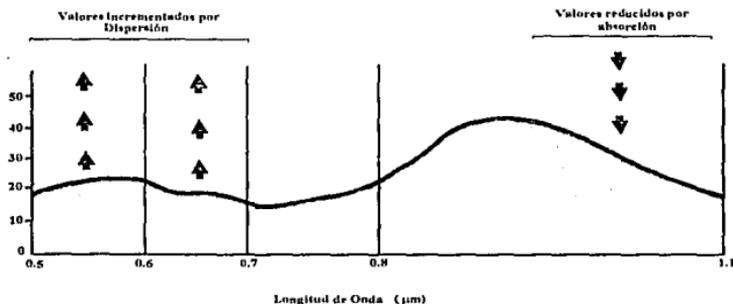


Figura V.1 Efectos combinados de la dispersión y absorción atmosférica en los valores de brillantez (VB) eventualmente producidos por los sistemas de sensores Landsat. (Tomada de: Tarantik, 1978)

Ocasionalmente, los sistemas de detección fallan al grabar los datos al inicio de la línea, este error es llamado *inicio de línea*. También un detector puede abruptamente dejar algunas veces de grabar datos a lo largo de la línea produciendo resultados similares al abandono de línea. Si el problema de inicio de línea es asociado con tendencias horizontales, éste se corrige con un simple ajuste horizontal. Sin embargo, si la cantidad de desplazamientos de inicios de líneas es aleatorio, su corrección es muy difícil sin una extensa interacción humana con base en el análisis de la imagen línea por línea.

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Los efectos atmosféricos de absorción y dispersión son otra fuente de errores radiométricos que afecta los datos de las imágenes de percepción remota. La dispersión atmosférica incrementa los valores de brillantez, en tanto que la absorción atmosférica hace que disminuyan los valores de brillantez de las mediciones espectrales (figura V.1). Las técnicas para minimizar estos efectos se basan en el hecho de que los datos del infrarrojo ( $>0.7 \mu\text{m}$ ) se encuentran libres en gran parte de los efectos de dispersión atmosféricas, mientras que en la región del visible ( $0.4-0.7 \mu\text{m}$ ) son influenciados fuertemente por ellos (Taranik, 1978).

El *ajuste del histograma* es una técnica usada para corregir los errores causados por los efectos atmosféricos, la cual involucra la evaluación de los histogramas de las imágenes. Normalmente, las bandas de longitudes de onda del visible (p.e. las bandas 1 a 3 del Thematic Mapper) tienen un valor mínimo muy alto debido a que el efecto de dispersión incrementa los valores de brillantez en estas bandas. Inversamente, la absorción de la atmósfera disminuye los valores de brillantez obtenidos en los intervalos de las longitudes de onda grandes (p.e. las bandas 4, 5 y 7 del Thematic Mapper). Este efecto hace que los datos de las bandas del infrarrojo tengan un mínimo cercano o igual a cero. La técnica de ajuste de histograma se basa en sustraer la tendencia (bias) establecida para cada banda espectral. Estas tendencias son determinadas por medio del análisis de los histogramas de cada una de las bandas que componen la imagen o del análisis de sus estadísticas univariadas. El algoritmo de corrección para el efecto de dispersión atmosférica se define como:

$$B_{ijk_{cor}} = VB_{ijk_{ent}} - bias \quad (V.4)$$

donde

$VB_{ijk_{sal}}$  = Valor del pixel corregido en la línea  $i$  columna  $j$  de la banda  $k$ .

$VB_{ijk_{ent}}$  = Valor del pixel de entrada en la misma posición

Las correcciones de absorción atmosférica son muy difíciles de realizar debido a que la absorción atmosférica es función del vapor de agua en la atmósfera. La cantidad de vapor de agua es variable, pero puede ser modelado para una imagen si existen suficientes datos de precipitación de agua de una estación meteorológica para la fecha y hora en que la imagen es adquirida.

### **Errores geométricos**

Los datos de las imágenes usualmente contienen errores geométricos importantes por lo que no pueden ser usadas como mapas. Las fuentes de estos errores incluyen la altitud, posición, velocidad de la plataforma del sensor, distorsión panorámica, curvatura de la tierra, etc. La corrección geométrica es aplicada para compensar los errores introducidos

por estos factores y poder usar la imagen como un mapa. Estos errores pueden ser divididos en dos clases: los que pueden ser corregidos usando los datos referentes al satélite y los conocimientos de las distorsiones internas del sensor; y aquellos que pueden ser corregidos con un número suficiente de *puntos de control*. Un punto de control es un punto en la superficie terrestre donde tanto las coordenadas de la imagen (medidas en columnas y renglones) y mapas coordenados (medidos en grados de latitud y longitud, pies o metros) pueden ser identificados. En esta sección se enfocará de manera general la corrección geométrica frecuentemente usada en aplicaciones geológicas llamada *rectificación geométrica*.

La rectificación geométrica es el proceso en el cual la geometría de una imagen se hace planimétrica (Haralick, 1973). El proceso involucra la relación de las coordenadas de los pixels (renglón y columna) con un mapa coordenado (p.e. un mapa de coordenadas UTM). Esta es la corrección geométrica más precisa ya que cada pixel puede ser referenciado no únicamente al renglón y columna de una matriz sino también en grados o metros en un mapa estándar de proyección. Los dos pasos básicos para la realización de la rectificación geométrica de una imagen a un sistema de mapa coordenados son las siguientes: (Green, 1983)

1. Identificación de las relaciones geométricas entre la localización de los pixels de entrada (renglón y columna) y las asociadas al mismo punto  $(x,y)$  en un mapa con coordenadas deben ser identificadas. Esto establecerá la naturaleza de la transformación de coordenadas geométricas que será aplicada para rectificar o reubicar algunos pixels en la imagen de entrada original  $(x',y')$  a su posición apropiada en la imagen rectificadas de salida  $(x,y)$ . Este proceso es llamado *interpolación espacial*.

2. Determinación de los valores de brillantez de los pixels. Desafortunadamente, esta no es una relación directa uno a uno entre el movimiento de los valores de los pixels de entrada y la localización de los pixels de salida. En general, una celda en la matriz de salida no esta directamente sobre un pixel en la matriz de entrada. Por consiguiente, los valores de intensidad o valores de brillantez eventualmente asignados a una celda en la matriz de salida es determinado en base a los valores de brillantez de los pixels que circundan esta posición transformada en la matriz original de entrada. Este proceso es llamado *intensidad de interpolación*.

#### V.4.4 Realce digital

Una imagen digital contiene más información de la que puede ser observada a simple vista, por lo que el realce implica la extracción de una cantidad mayor de información que la manifestada visualmente para una aplicación específica, así como el despliegue óptimo de dicha información. La palabra específica es importante dado que establece que las técnicas de realce están orientadas a resolver diferentes problemas. Por ejemplo, un método que sea muy útil para el realce de imágenes de rayos x en medicina no es necesariamente el mejor para el realce de imágenes transmitidas por medio de sondas espaciales.

Para poder interpretar una imagen, ésta debe permitir el reconocimiento y la correcta identificación de los rasgos de interés ya sea por procesos computacionales o de interpretación visual. El reconocimiento requiere como mínimo evocar un rasgo que esté presente; en tanto que la identificación requiere de una síntesis espectral, espacial y textural, además de otras características asociadas.

La extracción de diferentes rasgos que pueden ser utilizados en la fotointerpretación se lleva a cabo por medio de dos tipos de procesamiento: uno que trata el carácter radiométrico de la imagen llamado *realce radiométrico*; mientras que el otro tiene relación con el carácter geométrico de la imagen, el cual se conoce como *realce geométrico*.

El realce radiométrico se relaciona con la alteración del contraste de los pixels de la imagen. Estos procedimientos involucran la creación de nuevos valores de brillantez para un pixel a partir de los valores ya existentes, siendo estos procesos denominados también *operaciones de puntos o puntuales*. Dentro de estos procesos se trabaja tanto con *imágenes escalares*, en las cuales cada pixel tiene un solo valor de brillantez asociado a él, como con *imágenes vectoriales*, en donde cada pixel esta representado por un vector de valores de brillantez, (p.e. en una imagen multispectral estos valores pueden ser la diferente respuesta espectral del pixel en cada una de las bandas que componen la imagen digital).

Dentro de los reales geométricos se incluyen aquellos procesos, por medio de los cuales los detalles geométricos dentro de una imagen pueden ser modificados o realzados. En contraste con las operaciones puntuales usadas en el realce radiométrico, las técnicas de realce geométrico son caracterizadas por operaciones sobre una vecindad. Dicha vecindad o ventana es movida sobre la imagen renglón por renglón y columna por columna con lo que se obtiene un nuevo valor de brillantez para el pixel central de la ventana.

Las técnicas tanto de realce geométrico como radiométrico pueden ser agrupadas en: manipulación de contraste, manipulación de rasgos espaciales y manipulación de imágenes multispectrales. Dentro de estos amplios grupos se explicarán las siguientes técnicas:

1. *Manipulación de contraste*: modificación del contraste de la imagen tanto lineal como con saturación.
2. *Manipulación de rasgos espaciales*: filtrado espacial por medio de convolución.
3. *Manipulación de imágenes multispectrales*: cociente de bandas, análisis de componentes principales, composiciones de color y álgebra de imágenes.

### V.4.4.1 Manipulación de contraste

Los sensores remotos graban el flujo emitido y reflejado de los materiales de la superficie de la tierra. Idealmente un material puede reflejar una cantidad muy grande de energía en determinadas longitudes de onda mientras que otros pueden reflejar menor cantidad de energía en la misma banda. Lo anterior trae como consecuencia que exista un contraste entre los dos tipos de materiales cuando son grabados por los sistemas de

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

percepción remota. Sin embargo diferentes materiales algunas veces reflejan una cantidad similar del flujo radiante a través de la porción del visible e infrarrojo del espectro electromagnético resultando con ello imágenes con un contraste muy bajo. Para mejorar el contraste de la imagen y por ende su apariencia, es necesario utilizar todo el rango de brillantes disponible del medio de despliegue el cual es generalmente un sistema TRC (Ver Sección V.3). La técnica de *modificación del histograma* o *Contrast Stretch* expande los rangos estrechos de valores de brillantez presentes comúnmente en una imagen de entrada sobre un amplio rango de valores de gris. El resultado es una imagen de salida en las que se acentúan el contraste entre los diferentes materiales que componen la escena.

La técnica de modificación del histograma es simplemente un mapeo de los valores de brillantez del histograma de una imagen re-valorado más favorablemente. En general el nuevo histograma puede tener el mismo número de clases que el histograma original pero con diferente ubicación.

El mapeo de los valores de brillantez asociados con la modificación del histograma puede ser descrita por:

$$y = f(x) \quad (V.5)$$

donde  $x$  es el valor de brillantez original de una clase particular del histograma y  $y$  es su correspondiente nuevo valor de brillantez.

En la figura V.2, el número de pixels representado por el rango de  $y$  a  $y+\delta y$  en el histograma modificado, por definición debe ser igual al número de pixels representado por el rango de  $x$  a  $x+\delta x$  en el histograma original.

Si  $h_i(x)$  es la función del histograma de la imagen original y  $h_o(y)$  es la función del histograma modificado de la imagen y a su vez ambos son funciones de la densidad de los valores de brillantez, entonces:

$$h_i(x) \delta(x) = h_o(y) \delta(y) \quad (V.6)$$

en el límite cuando  $\delta x$  y  $\delta y$  tienden a cero

$$h_i(x) dx = h_o(y) dy \quad (V.7)$$

$$h_o(y) = h_i(x) \frac{dx}{dy} \quad (V.8)$$

si  $y=f(x)$  y  $x=f^{-1}(y)$  entonces:

$$h_0(y) = h_1(f^{-1}(y)) \frac{d(f^{-1}(y))}{dy} \quad (V.9)$$

la cual es la expresión analítica general del histograma modificado de salida.

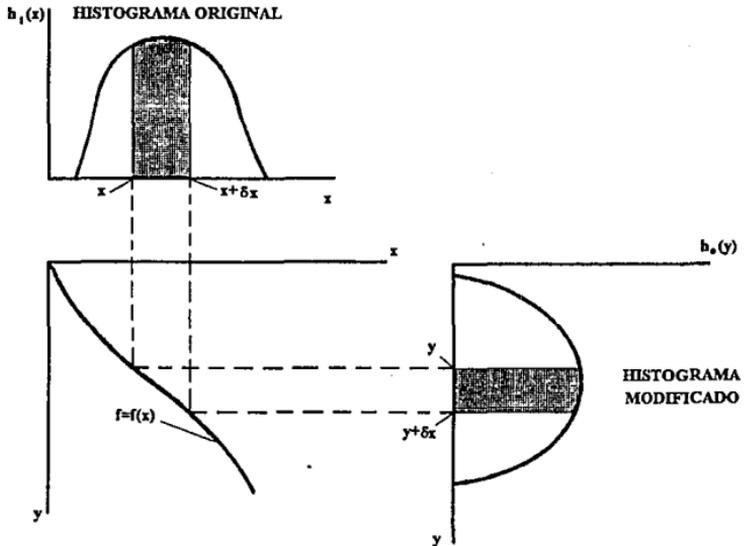


Figura V.2 Representación diagramática de la modificación del histograma para el mapeo de los valores de brillantez de la función  $y=f(x)$ .

### Modificación de contraste lineal y con saturación

Para llevar a cabo una modificación de contraste lineal se expande el rango de valores de brillantez presente en una imagen de forma uniforme usando el algoritmo:

$$B_{Sal} = \frac{VB_{Ent} - VB_{Afn}}{VB_{Akr} - VB_{min}} \times VB_r \quad (V.10)$$

donde:

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

- $VB_{Sal}$  = Valor de brillantez de salida  
 $VB_{Ent}$  = Valor de brillantez de entrada  
 $VB_{Max}$  = Valor máximo de brillantez del histograma a ser modificado  
 $VB_{Min}$  = Valor mínimo de brillantez del histograma a ser modificado  
 $VB_r$  = Rango de valores de brillantez que puede ser desplegados

La lógica de la técnica de modificación de contraste lineal se muestra en forma esquemática en la figura V.3.

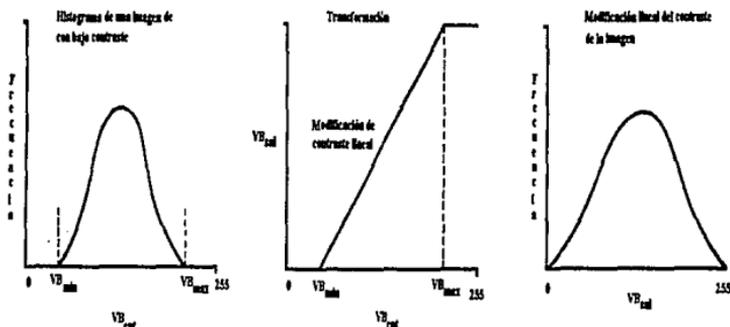


Figura V.3 Esquema conceptual de la técnica de modificación lineal de histograma.

Frecuentemente se obtiene una mejor presentación de la imagen realizada dando un porcentaje de saturación a los extremos del histograma modificado de la imagen. Esta saturación de los extremos es muy útil en los casos en que las regiones oscuras o brillantes en una imagen correspondan a un tipo específico de rasgo en la escena (p.e. los bordes dentro de una imagen, que son representados tanto en tonos brillantes como oscuros). En esta técnica de *saturación de histograma* el analista especifica los porcentajes de saturación para cada uno de los extremos del histograma así como el valor máximo y mínimo de los valores de brillantez dentro de estos porcentajes. La representación gráfica de este proceso se ilustra en la figura V.4.

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

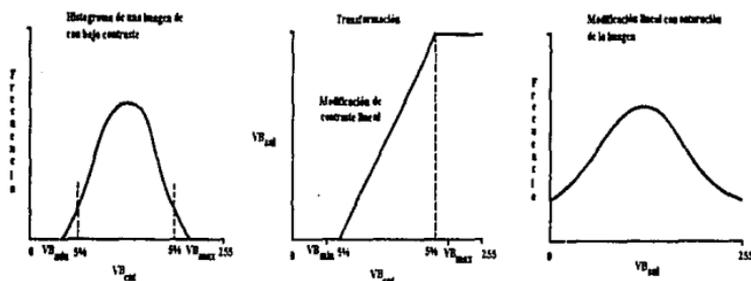


Figura V.4 Representación gráfica del proceso de saturación de histograma

### V.4.4.2 Manipulación de rasgos espaciales

Una de las características de las imágenes de satélite y en general de las imágenes digitales es el parámetro llamado *frecuencia espacial*. La frecuencia espacial se define como el número de cambios en los valores de brillantez por unidad de distancia para un región particular de la imagen. Si una región dentro de la imagen presenta cambios graduales en los valores de brillantez, la región es referida como de *baja frecuencia*. A la inversa, una región de *alta frecuencia* es asociada a cambios abruptos en los valores de brillantez en una distancia muy corta (p.e. borde, líneas, etc). En otras palabras, la frecuencia espacial describe los cambios en los valores de brillantez sobre una región particular de la imagen. Estos cambios en los valores de brillantez dentro de la imagen pueden ser procesados para producir diferentes realces. Consecuentemente, la frecuencia espacial es un parámetro muy útil para la extracción de información espacial cuantitativa de una imagen.

El proceso para extraer información espacial de los datos de una imagen digital es el *filtrado de la frecuencia espacial*. Este filtrado consiste en un realce selectivo de las variaciones de frecuencia de los valores de brillantez de una imagen a partir de transformaciones matemáticas. Una de las técnicas matemáticas para extraer las componentes de frecuencia espacial de una imagen es el *Análisis de Fourier*. La *Transformada de Fourier* de una imagen da como resultado la separación de ciertos grupos de frecuencias los cuales pueden ser enfatizados o suprimidos por medio de algoritmos llamados *filtros*. La Transformada de Fourier opera en el dominio de la frecuencia. Otra técnica de filtrado es el proceso llamado *Convolución*, el cual opera en el dominio espacial. La convolución de una imagen involucra el movimiento de una ventana que contiene un arreglo de coeficientes o "factores de peso". Estos arreglos son referidos como *operadores* o *kernel*. El kernel es movido en la imagen original y el valor de brillantez del centro del kernel en una segunda imagen de salida (convolucionada) se obtiene multiplicando cada coeficiente en el kernel por el correspondiente valor de brillantez en la imagen original y sumando todos los productos resultantes. Esta operación se lleva a cabo para cada uno de

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

los pixels de la imagen original. Sin embargo, el filtrado en el dominio de la frecuencia es más potente que el filtrado en el dominio espacial, pero requiere de un mayor tiempo de cómputo e involucra operaciones más complejas. Estas son las razones de que en la mayoría de los sistemas de procesamiento de imágenes se utilicen filtros de convolución para el realce de las frecuencias de la imagen.

Los procesos de convolución son usados para generar filtros *pasa-bajas* y *pasa-altas*. Los primeros son utilizados para remover el ruido presente en la imagen y los segundos para resaltar los cambios bruscos de frecuencia dentro de una imagen. El grado de realce de la convolución sobre una imagen depende directamente del tamaño del kernel usado y de los valores de los coeficientes contenidos dentro del kernel.

Un riesgo con el uso del filtrado para el realce de bordes es la creación de bordes artificiales llamados *artefactos*, los cuales pueden simular rasgos geológicos regulares tales como fallas. Estos artefactos tienen una relación geométrica regular a la dirección de filtrado por lo que pueden ser ignorados durante la interpretación. Además existen numerosos coeficientes que pueden ser colocados dentro de una ventana. Sin embargo, el analista usualmente trabaja en forma interactiva con los datos de la imagen probando coeficientes y seleccionando aquellos que producen los resultados de realce deseados (Jensen, 1986). También es posible hacer combinaciones con diferentes coeficientes (Emberlein y Weszka, 1975).

### *Operaciones de convolución contra Transformada de Fourier*

Por lo general, los procedimientos de realce son implementados usando la transformada de Fourier o procedimientos de convolución por medio de ventanas pero la pregunta a contestar sería ¿cuál procedimiento usar?. La respuesta a dicha pregunta depende de factores tales como la disponibilidad de software, la familiaridad con cada uno de estos procedimientos y su uso fácil, además de consideraciones relacionadas al tiempo de proceso requerido por la computadora. Esta última consideración se trata a continuación para determinar desde el punto de vista del costo de tiempo de cómputo la selección de un procedimiento u otro. Tanto los procesos en el dominio de la frecuencia como los procesos de convolución consisten únicamente de multiplicaciones y sumas. Por lo tanto, el tiempo de cómputo utilizado por estos procesos es medido en base al número realizado de estas operaciones por cada uno de ellos para obtener los mismos resultados

Para una imagen de  $k \times k$  pixels y una ventana de  $m \times n$  pixels el total de multiplicaciones en el dominio espacial necesarias para evaluar dicha ventana en toda la imagen es: (Richards, 1986).

$$N_c = mnk^2 \quad (V.11)$$

y el número de multiplicaciones en el dominio de la frecuencia:

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

$$N_f = 2k^2 \log_2 k + k^2 \quad (V.12)$$

la comparación del tiempo de computo usado por los procesos esta dado por el cociente:

$$\frac{N_c}{N_f} = \frac{mn}{2 \log_2 k + 1} \quad (V.13)$$

cuando el cociente  $N_c/N_f$  es menor que 1 el uso del proceso de convolución es más económico. De lo contrario el proceso de transformada de Fourier es más efectivo en tiempo de computo.

La Tabla V.7 muestra los valores del cociente  $N_c/N_f$  para imágenes y ventanas de diferente tamaño, donde se puede ver que la ventana de  $3 \times 3$  proporciona el realce requerido a un costo de tiempo menor que la transformada de Fourier.

Tabla V.7 Tiempos de computo requeridos para el realce por medio de procesos de convolución comparados con los procesos de transformada de Fourier en base a la ecuación V.13.

Tamaño de la ventana	3x3	3x5	5x5	5x7	7x7
16x16	1.00	1.67	2.78	3.89	5.44
64x64	0.69	1.15	1.92	2.69	3.77
128x128	0.60	1.00	1.67	2.33	3.27
256x256	0.53	0.88	1.47	2.06	2.88
512x512	0.47	0.79	1.32	1.84	2.58
1024x1024	0.43	0.71	1.19	1.67	2.33
2048x2048	0.39	0.65	1.09	1.52	2.13
4096x4096	0.36	0.60	1.00	1.40	1.96

**Filtrado de bajas frecuencias (suavizado)**

Dada una imagen de  $f(i,j)$  de  $N \times N$  el proceso para generar una imagen filtrada  $g(i,j)$  de los valores de brillantez de los pixels de  $f$  contenidos en una vecindad predefinida de  $(i,j)$  se realiza a través de la ecuación: (Gonzalez y Wintz, 1977)

$$g(i, j) = \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in S} f(i, j) \quad (V.14)$$

para toda  $i,j=0,1,2,3,\dots,N-1$ .  $S$  es el conjunto de coordenadas de los puntos en la vecindad del punto  $(i,j)$  y  $M$  es el total de puntos definidos por las coordenadas en  $S$ .

El filtrado de una imagen usando la ecuación V.14 es un simple promedio de los valores de brillantez de los pixels de la imagen contenidos dentro de la vecindad. El tamaño

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

de la vecindad es usualmente de  $3 \times 3$ , es decir de nueve puntos contenido dentro y en la frontera de un círculo de radio  $\sqrt{2}$ . El conjunto  $S$  de coordenadas de los puntos a una distancia  $\sqrt{2}$  del punto  $(i, j)$  es:

$$S = \begin{bmatrix} (i, j + 1) & (i, j - 1) & (i + 1, j) \\ (i - 1, j) & (i, j) & (i - 1, j - 1) \\ (i - 1, j + 1) & (i + 1, j - 1) & (i + 1, j + 1) \end{bmatrix} \quad (\text{V.15})$$

Esta técnica de filtrado por medio del promedio de los valores de brillantez que inciden en la ventana es conocida como *filtro del valor medio* o *media*.

La ecuación V.14 implica las operaciones siguientes: si  $V=(V_1, V_2, \dots, V_9)$  es el vector de coeficientes de una ventana de  $3 \times 3$  como la mostrada a continuación:

$$V = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 \\ V_4 & V_5 & V_6 \\ V_7 & V_8 & V_9 \end{bmatrix} \quad (\text{V.16})$$

y  $P=(P_1, P_2, \dots, P_9)$  es el vector de los valores de brillantez de los pixels de la imagen contenidos en la ventana y cuyas posiciones son dadas por el vector  $S$  de coordenadas de la expresión V.15. Entonces la primera operación implícita en la ecuación V.14 es el producto interno de los vectores  $V$  y  $P$  donde los primeros tres elementos del vector  $V$  representan el primer renglón del arreglo matricial V.16 y así sucesivamente. El producto interno de los vectores  $P$  y  $V$  es:

$$PI_{SP} = (S_1 P_1 + S_2 P_2 + \dots + S_9 P_9) = \sum_{i=1}^{n \times n} S_i P_i \quad (\text{V.17})$$

La segunda operación es la división del producto interno de los vectores  $V$  y  $P$  entre el total de puntos definidos por el vector de coordenadas  $S$  (para este ejemplo, el total de puntos contenidos en el vector  $S$  es igual a nueve). Entonces el pixel en la posición  $(i, j)$  de la imagen filtrada está dado por:

$$g(i, j) = \frac{\sum_{i=1}^{n \times n} P_i V_i}{9} \quad (\text{V.18})$$

repetiéndose esta operación para cada una de las posiciones de los pixels de la imagen a filtrar. El tercer paso es remplazar el valor del pixel en la posición central de la ventana por el resultado de la ecuación V.18.

La convolución de la ventana  $V$  de la expresión V.16 con todos sus coeficientes iguales a uno y cualquier imagen da como resultado el suavizado de dicha imagen (Sullivam, 1984). El suavizado por medio del valor medio es muy útil para remover el ruido periódico como es el efecto de "sal" y "pimienta" algunas veces presentes en las imágenes Landsat.

Una técnica alternativa para el suavizado, en la cual los bordes de una imagen son mejor retenidos que en el filtrado usando el valor medio, es el filtrado por medio del uso de la mediana. En este proceso de suavizado llamado *filtro de mediana*, el pixel del centro de la ventana esta dada por la mediana de los valores de brillantez de los pixels que inciden en ella. La mediana se define como el valor central de los datos cuando estos no están agrupados pero si ordenados. La regla para seleccionar el valor central varía para un número par o impar de datos. Si hay un número impar de datos la mediana es precisamente el valor central. Por ejemplo, la mediana del conjunto de valores de brillantez (4,6,3,7,9,2,1,8,8) es 6 mientras que la media es de 5.3. La figura V.5 muestra el efecto de un filtrado de mediana para una línea de datos de una imagen comparado con un filtrado por valor medio, donde se puede ver que la mayoría de los bordes originales son retenidos.

El suavizado por medio de la mediana es usado para remover los impulsos tales como el ruido. Esto se debe a que los pixels correspondientes al ruido son anormales en su vecindad. Por este método, el valor de brillantez de estos pixels es remplazado por un valor de brillantez más acorde a los valores que los circundan.

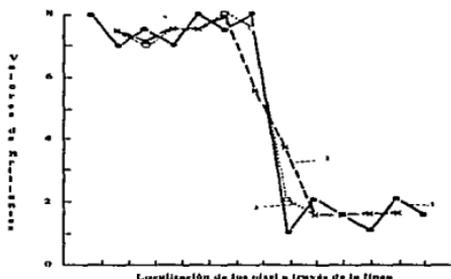


Figura V.5 Comparación de un filtrado por medio de la mediana y del valor medio para una línea de datos de una imagen: 1) imagen original, 2) filtrado 3x1 por valor medio y 3) filtrado 3x1 por mediana.

### Filtrado de alta frecuencia (realce de bordes)

Cuando un analista examina una región a través de la cual los valores de brillantez cambian en forma gradual es difícil que observe algún tipo de discontinuidad que divida a la región en partes. Si los cambios en los valores de brillantez a través de la región son abruptos el analista puede observar casi inmediatamente discontinuidades que cortan o dividen a la región en una o varias partes. Estas discontinuidades son llamadas *bordes*.

Los bordes pueden tomar diferentes formas, siendo el más común el *borde de escalón* ilustrado en forma ideal en la figura V.6a. Un borde de escalón separa dos regiones en la que los valores de brillantez son relativamente uniformes en cada una de ellas con diferentes valores a ambos lados de dicho borde. Otro tipo importante de discontinuidad en los valores de brillantez son la *líneas*, las cuales son bandas delgadas que difieren de la región a ambos lados de esta como se muestra en la figura V.6b. También es frecuente que las líneas ocurran en combinación con bordes de escalón. Una idealización de esta combinación se muestra en la figura V.6c.

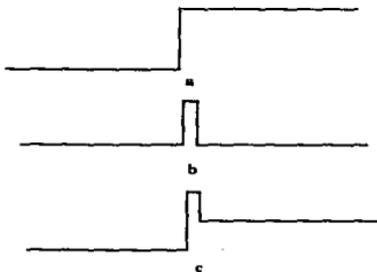


Figura V.6 Secciones idealizadas de bordes: a) Borde de escalón, b) Borde de línea y c) Borde de líneas combinado con borde de escalón.

El proceso más usado para el realce de estos bordes es la utilización de diferencias entre los valores de brillantez presentes en la imagen. Otra propiedad algunas veces usada es la diferencia de textura<sup>1</sup> en una región.

### Laplacianos

El Laplaciano de una función de dos variables  $f(x,y)$  definido como:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (V.19)$$

<sup>1</sup> La textura es la frecuencia de cambios y arreglos de tonos en una imagen.

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

es un operador de derivada lineal de segundo orden y rotación invariante (Rosenfeld, 1976), que realza los bordes sin importar su dirección enfatizando los valores máximos o "picos" de la imagen.

Para entender el efecto del Laplaciano en el realce de bordes, consideremos una imagen hipotética con aspecto borroso<sup>2</sup> resultado de los procesos de difusión que satisfacen la ecuación diferencial:

$$\frac{\partial g}{\partial t} = k \nabla^2 g \quad (\text{V.20})$$

donde  $g$  es una función de  $(x, y)$  y  $t$  el tiempo con la constante  $k > 0$ . Para un tiempo  $t=0$ , la imagen  $g(x, y, 0)$  no presenta el aspecto borroso, en tanto que para un tiempo  $t=\tau > 0$  tendríamos una imagen  $g(x, y, \tau)$  con aspecto borroso. Si expandemos  $g(x, y, \tau)$  en Serie de Taylor alrededor de  $t=\tau$  tenemos:

$$g(x, y, 0) = g(x, y, \tau) - \tau \frac{\partial g}{\partial t}(x, y, \tau) + \frac{\tau}{2} \frac{\partial^2 g}{\partial t^2}(x, y, \tau) \quad (\text{V.21})$$

si anulamos el término cuadrático así como los términos de mayor orden y sustituimos  $f$  por  $g(x, y, 0)$  y  $k\nabla^2 g$  por  $\partial g/\partial t$ , entonces:

$$f = g - k\tau \nabla^2 g \quad (\text{V.22})$$

la cual es una primera aproximación con la que la imagen  $f$  sin el aspecto borroso puede ser restaurada sustrayendo de la imagen  $g$  un múltiplo positivo del Laplaciano.

Para una imagen digital el análogo discreto del Laplaciano es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} &\cong \Delta^2 x f(i, j) + \Delta^2 y f(i, j) \\ &\cong f(i+1, j) - 2f(i, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) - 2f(i, j) + f(i, j-1) \\ &\cong f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j) \end{aligned} \quad (\text{V.23})$$

---

<sup>2</sup> del ingles BLURR

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Para ilustrar mejor el efecto del Laplaciano sobre una imagen consideremos el siguiente ejemplo numérico: supongamos que la imagen digital  $f$  de  $1 \times n$  contiene la siguiente secuencia de valores de brillantez

$$\dots, 0, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 3, 3, 3, 3, \dots \quad (V.24)$$

entonces  $\Delta^2 x$  tiene los siguientes valores

$$\dots, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 0, 0, -3, 3, 0, 0, 0, \dots \quad (V.25)$$

La gráfica en la figura V.7 muestra la secuencia original de los valores de  $f$  y la secuencia de los valores modificados al aplicar el laplaciano. Si comparamos ambas gráficas se puede observar que  $\Delta^2 x(f)$  es cero en los intervalos que presentan valores de brillantez uniformes o rampas y diferentes de cero en el extremo inferior y superior de la rampa y a cada lado de un escalón.

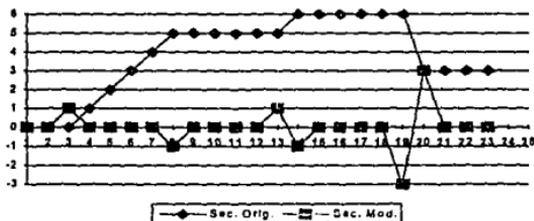


Figura V.7 Efecto del Laplaciano sobre una imagen.

La ecuación V.23 puede ser implementada a partir de la convolución de  $f(x,y)$  con el operador:

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (V.26)$$

Si sustraemos  $\Delta^2 x(f)$  de  $f$  punto por punto se obtienen valores de brillantez bajos en la parte inferior de la rampa y en las partes bajas de los bordes y valores altos en la parte

superior de la rampa y en las partes altas de los bordes. Esto tiene el efecto de incrementar la pendiente de las rampas y el contraste en los bordes como se muestra en la secuencia V.27 y en la gráfica de la figura V.8.

$$\dots, 0, 0, -1, 1, 2, 3, 4, 6, 5, 5, 5, 4, 7, 6, 6, 6, 9, 0, 3, 3, 3, \dots \quad (V.27)$$

De la gráfica de la figura V.8 tenemos que  $f - \nabla^2 f = f$  cuando  $(i, j)$  se encuentra a la mitad de una rampa o en la región plana de un intervalo. Si  $(i, j)$  se localiza en la parte inferior de la rampa o en la parte inferior de un borde, (de manera que los valores de brillantez que circundan al punto  $(i, j)$  son mayores que este) se tiene  $(f - \nabla^2 f) < f$  en  $(i, j)$ , lo que produce un valor pequeño. De forma similar, si el punto  $(i, j)$  se localiza en la parte superior de una rampa o de un borde y ninguno de los valores de brillantez que circundan a  $(i, j)$  son mayores que este, entonces  $(f - \nabla^2 f) > f$  en  $(i, j)$  produce un valor alto en la imagen de salida.

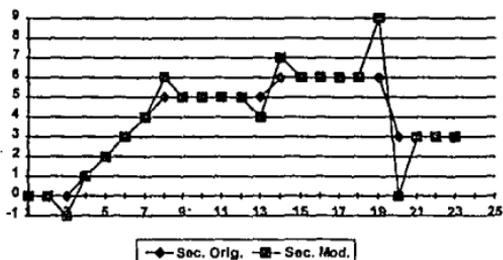


Figura V.8 Efecto de la sustracción del Laplaciano sobre una imagen

La sustracción del Laplaciano de una imagen digital se puede expresar en términos de diferencias como:

$$f(i, j) - \Delta^2 f(i, j) = f(i, j) - [f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j)] \quad (V.28)$$

$$= 5f(i, j) - [f(i-1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1)]$$

o convolucionando  $f$  con la ventana.

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (V.29)$$

**Gradientes direccionales (compass gradient)**

Un medio para realizar los bordes dentro de una imagen con una orientación en particular, es el uso de la diferenciación discreta bidimensional, implementada a partir de matrices cuadradas (Robinson, 1977). El gradiente de la matriz tiene un valor de cero (la suma de los coeficientes de la matriz es cero), sobre una región con valores de brillantez constantes (p.e. donde no se presentan bordes) (Pratt, 1978). Las ventanas de gradiente direccional de Prewitt son listadas en la Tabla V.8. El nombre de las ventanas sugieren la dirección de máxima pendiente. Por ejemplo, la ventana del gradiente oeste (W) produce el máximo valor de salida para los cambios de valores de brillantez horizontales de derecha a izquierda.

Tabla V.8 Ventanas de gradiente direccional de Prewitt

$N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$NE = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$	$E = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$SE = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
$S = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$SO = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$O = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$	$NO = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$

**V.4.4.3 Manipulación de imágenes multispectrales**

**Cocientes de bandas**

Los cocientes de bandas son reales espectrales de una imagen que resultan de la división de los valores de brillantez en una banda espectral por su correspondiente valor en otra banda. Esta técnica minimiza el efecto producido por las condiciones topográficas y los cambios en las condiciones de iluminación de la escena. También, son muy útiles para discriminar diferencias espectrales sutiles que son enmascaradas por las variaciones de brillantez en las imágenes de las bandas individuales o en las composiciones de color estándares. Esta discriminación en el realce se debe a que los cocientes representan los cambios en las pendientes de las curvas de reflectancia espectral de las dos bandas involucradas. Estas pendientes (de las curvas espectrales) son por lo general diferentes para los distintos materiales en ciertas bandas del sensor (p.e. en el cociente infrarrojo cercano/rojo, la vegetación sana presenta normalmente valores altos y la vegetación enferma valores bajos). Por lo tanto, la distribución espacial (histogramas bidimensionales) (Ver Sección V.4.2) de los datos de los cocientes de bandas es más significativa en términos de la reflectancia de los pixels o composición de los mismos. Los cocientes de bandas también son usados para generar composiciones en color por medio de la

combinación de tres cocientes monocromáticos. Tales combinaciones tienen la ventaja de combinar los datos de más de dos bandas y de presentar los datos a color, lo que facilita la interpretación de diferencias sutiles en la respuesta espectral de diferentes materiales.

La forma y número de combinaciones de los cocientes de las bandas de una imagen multispectral para su análisis varía de acuerdo con la fuente de datos digitales y del objetivo de estudio. El número de combinaciones que pueden ser obtenidas a partir de  $n$  bandas es de  $n(n-1)$  (p.e. para una imagen Landsat-TM con 7 bandas espectrales, el número de combinaciones es de  $7(7-1)=42$ ) y la forma de las combinaciones son a partir de las características particulares de reflectancia de los materiales que se pretendan diferenciar. Generalmente, las bandas con una menor correlación generan el mayor contenido de información en las imágenes de cocientes de bandas. Matemáticamente la función cociente es dada por la expresión:

$$B_{ijr} = \frac{VB_{ijk}}{VB_{ijl}} \quad (V.30)$$

donde  $VB_{ijr}$  es el valor del cociente de salida para el píxel en el renglón  $i$  columna  $j$ ;  $VB_{ijk}$  es el valor de brillantez en la misma posición en la banda  $k$  y  $VB_{ijl}$  el valor de brillantez en la banda  $l$ . Desafortunadamente, el cálculo de  $VB_{ijr}$  no es siempre posible cuando  $VB_{ijl}$  es igual a cero lo que produce un valor indeterminado. Sin embargo, una solución este problema es simplemente sustituir con un valor de 1 los  $VB_{ijl}$  iguales a cero o sumar un valor pequeño (p.e. 0.1) al denominador si este es igual a cero.

### **Componentes principales**

La transformación de componentes principales es un método estadístico que se aplica cuando se dispone de un conjunto de datos multivariados y no puede postularse una estructura particular de las variables o cuando se desea conocer la relación entre los elementos de una población y la manera en que esta influye en las variables o en las propiedades de los elementos.

El carácter multispectral o vectorial de los datos de la imágenes digitales hace fácil la aplicación de transformaciones espectrales (componentes principales) para generar nuevos juegos de bandas o componentes. Estas componentes representan una descripción alternativa de los datos, en que las nuevas componentes de un vector de píxeles se relacionan a sus valores de brillantez originales (es decir a la banda espectral original) vía una operación lineal. La imagen transformada puede hacer evidente rasgos que nos sean claros en los datos originales o posible la preservación del contenido de información esencial de la imagen para una aplicación particular con un reducido número de dimensiones transformadas. Este último punto (de reducir la dimensionalidad de las imágenes, por ejemplo, de siete a tres bandas), ha sido significativo porque a veces el volumen disponible de datos es muy grande y no todos ellos proveen información útil para la solución del

problema; además, las composiciones en color (RGB) de una imagen se limita únicamente a tres bandas. Por medio de esta transformación los datos de las imágenes son redistribuidos en un nuevo juego de ejes ortogonales de tal manera que las imágenes resultantes son decorrelacionadas, reteniéndose la mayor cantidad de varianza en la primera componente decreciendo en las componentes subsiguientes. La varianza estadística representa el contraste de las imágenes originales y está influenciada por la dimensionalidad de las mismas, por lo que se utiliza como una medida del contenido de información en cada una de las componentes resultantes.

### ***Método de componentes principales***

Al estudiar un conjunto de  $n$  individuos mediante  $p$ -variables (en este caso una imagen digital con  $n$  bandas) es posible encontrar nuevas variables denominadas  $Y(k)$  con  $k=1, \dots, p$  que son combinaciones lineales de las variables originales  $x(j)$ , imponiendo a este sistema ciertas condiciones que permitan satisfacer las siguientes características:

- Los componentes principales no están correlacionados
- Cada componente principal sintetiza la máxima varianza residual contenida en los datos.

esto implica encontrar ( $p \times p$ ) constante tal que:

$$Y(k) = \sum_{j=1}^p l(j, k)x(j), \quad k = 1, \dots, p \quad (V.31)$$

donde  $l(j, k)$  es cada una de estas componentes. Obsérvese que debido a la sumatoria en cada una de las variables  $Y(k)$  intervienen todos los valores de las variables originales  $x(j)$ . El valor numérico de  $l(j, k)$  indica el grado de contribución que cada variable original aporta a la nueva variable  $Y(k)$  definida por la transformación lineal. Es posible que  $l(j, k)$  tenga en algún caso particular el valor cero o muy cercano a cero lo cual indica que esa variable no influye en el valor de la nueva variable  $Y(k)$ .

Si se concibe la transformación que produce las componentes principales como aquella que genera un nuevo conjunto de coordenadas o ejes que sean perpendiculares entre sí, entonces el coseno del ángulo formado por dos cualesquiera de los ejes debe de ser cero. Estas condición puede expresarse como:

$$\sum_{j=1}^p l(j, k)l(j, m) = 0 \quad k \neq m$$

$; k, m = 1, \dots, p$  (V.32)

$$\sum_{j=1}^p l(j, k)l(j, m) = 1 \quad k = m$$

la cual se denomina *Delta de Kronecker*.

Es posible expresar la condición anterior en forma matricial si se define una matriz  $L$  como el arreglo de las  $(p \times p)$  constantes  $l(j,k)$ .

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & \dots & l_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{p1} & \dots & l_{pp} \end{bmatrix} \quad (\text{V.33})$$

si  $L$  satisface la condición de ortogonalidad:

$$LL^T = L^T L = L^{-1} L = I \quad (\text{V.34})$$

entonces se puede expresar la transformación lineal de componentes principales en términos de la matriz.

$$Y_{(n \times p)} = X_{(n \times p)} L_{(p \times p)} \quad (\text{V.35})$$

La ecuación V.35 expresa la matriz original (es decir una matriz de datos), a la que se aplica la transformación ortogonal  $L$  para obtener una nueva matriz  $Y$  de igual dimensión a la matriz original. Esta nueva matriz  $Y$  tendrá una matriz de varianza-covarianza que será diagonal ya que las nuevas variables no estarán correlacionadas. Por la forma en que se generan los componentes principales, también satisfacen la condición de resumir en forma decreciente la varianza del conjunto original de datos.

En términos de operaciones matemáticas, la transformación de componentes principales se resume en:

- 1.- El cálculo de la matriz de varianza-covarianza de la imagen;
- 2.- El cálculo de los valores y vectores característicos de la matriz de varianza-covarianza. Los vectores característicos definen la dirección de los componentes principales y los valores característicos miden la varianza de la distribución de los rasgos espaciales a lo largo de los componentes principales; y
- 3.- La generación de los componentes principales a partir de la utilización de los vectores característicos como factores de peso de las bandas originales.

### Matriz de varianza-covarianza

Si consideramos, un espacio multispectral con un número grande de pixels y graficamos estos pixels como se muestra en la figura V.9 (en la que cada pixel está descrito por su vector  $x$ ), la posición media de los pixels en dicho espacio es definida por el valor del vector de pixels  $\bar{x}$ , de acuerdo a:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k x_j \quad (V.36)$$

donde  $\bar{x}$  es la media de los vectores formados por los pixels y  $x_j$  son los vectores de pixels individuales de un total  $k$ .

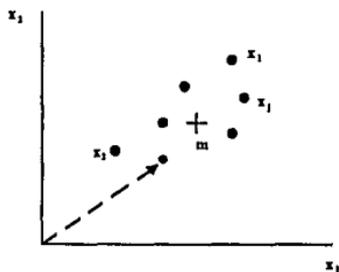


Figura V.9 Espacio espectral de dos dimensiones que muestra los vectores de pixels individuales y su posición media representada por el valor de  $\bar{x}$ .

El vector  $\bar{x}$  es útil para definir el promedio o la posición esperada de los pixels, dentro del espacio multispectral de vectores. También es un medio disponible para describir la dispersión o la gráfica de los vectores en el espacio multispectral. Sin embargo, este es el papel de la matriz de covarianza que en su forma vectorial es definida como:

$$\sum x = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (x_j - \bar{x})(x_j - \bar{x})^T \quad (V.37)$$

en la cual el superíndice  $T$  indica el vector transpuesto.

La matriz de varianza-covarianza es un concepto importante en el análisis de las imágenes multiespectrales, porque a partir de ella se puede ver si existe correlación entre las bandas de una imagen, si los elementos fuera de la diagonal principal de la matriz (de varianza-covarianza) son mayores que los elementos de la diagonal principal. Por otro lado, si existe una correlación pequeña o nula, los elementos fuera de la diagonal principal deberán ser cercanos a cero o cero. La correlación o no correlación de los datos de una imagen también puede ser descrita por la matriz de correlación (Ver Sección V.5.1). Lo anterior se ilustra a continuación.

Considere dos juegos de datos bidimensionales (figuras V.10), en las que se muestran dos bandas con una correlación muy pequeña (figura V.10a) y dos bandas con una correlación muy alta (figura V.10b).

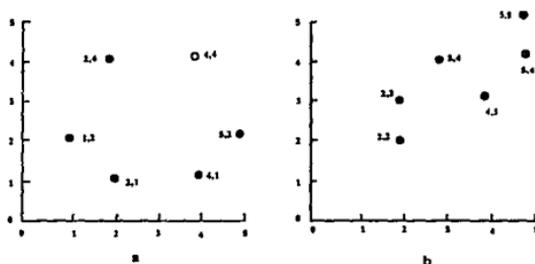


Figura V.10 Juego de datos bidimensionales que muestran: a) no correlación entre las bandas y b) correlación entre las bandas

La Tabla V.9 muestra la matriz de varianza-covarianza y de correlación para la figura V.10a obtenidas a partir de la ecuación V.37 para la matriz de varianza-covarianza y la ecuación V.3 para la matriz de correlación. De la matriz de correlación se observa que no existe correlación entre los datos de las bandas, un hecho que también es evidente es que los elementos fuera de la diagonal principal de la matriz de varianza-covarianza son iguales a cero. El valor de 2.40 de la esquina superior izquierda de la matriz de varianza-covarianza significa que los datos tienen una varianza de 2.40 a lo largo del eje horizontal. Similarmenete, la varianza vertical es de 1.87.

Tabla V.9 Matriz de varianza-covarianza y de correlación para los datos de la figura V.10a

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 2.40 & 0 \\ 0 & 1.87 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 1.00 & 0 \\ 0 & 1.00 \end{bmatrix}$$

Para los datos de la figura V.10b la matriz de varianza-covarianza y de correlación son:

$$\bar{m} = \begin{bmatrix} 3.50 \\ 3.50 \end{bmatrix} \quad \sum r = \begin{bmatrix} 1.900 & 1.100 \\ 1.100 & 1.100 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.761 \\ 0.761 & 1.00 \end{bmatrix}$$

De la matriz de correlación de los datos de la figura V.10b se puede ver que los datos de las bandas 1 y 2 presentan una correlación del 76%. También se puede observar que tanto la matriz de correlación y de varianza-covarianza son simétricas y que en los datos sin correlación son diagonales.

Lo anterior es fundamental para la transformación de componentes principales, donde el objetivo es encontrar un nuevo sistema de coordenadas en la que los datos puedan ser representados sin correlación; es decir la matriz de varianza-covarianza en el nuevo sistema de coordenadas deberá ser diagonal.

### *Generación de los componentes principales*

Para un espacio vectorial de dos dimensiones con un nuevo sistema coordenado como se muestra en la figura V.11. Si representamos los vectores que describen los pixels en el nuevo sistema coordenado con  $y$ , entonces se puede encontrar una transformación lineal  $G$  de las coordenadas originales como la expresada en la ecuación V.35 tal que:

$$Y = GX \tag{V.38}$$

sujeta a la condición de que la matriz de covarianza-varianza en el espacio  $y$  sea diagonal.

En el espacio  $y$  la matriz de covarianza es por definición: (Richards, 1986)

$$\sum r = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (y_j - \bar{m}_j)(y_j - \bar{m}_j)^T \tag{V.39}$$

donde  $\bar{m}_j$  es el vector media expresado en términos de las coordenadas  $y$  el cual puede ser representado como:

$$\bar{m}_y = GX = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k GX_j = G \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k X_j = G \bar{m}_x \tag{V.40}$$

donde  $\bar{m}_x$  es el vector media en el espacio  $x$ .

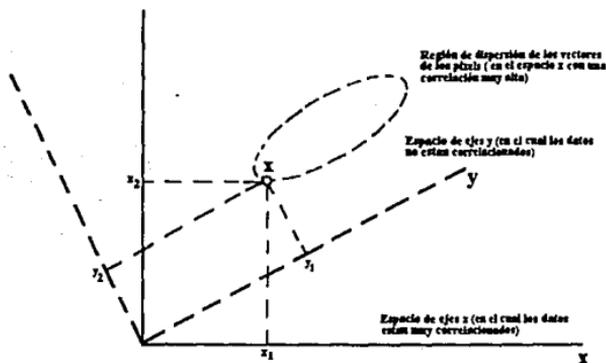


Figura V.11 Ilustración de un sistema de coordenadas modificado en el cual los vectores de píxeles tienen componentes decorrelacionadas

Por lo tanto se tiene que:

$$\sum r = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (GX_j - G\bar{m}_r)(GX_j - G\bar{m}_r)^T \quad (V.41)$$

que puede ser re-escrita como:

$$\sum r = G \left[ \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (X_j - \bar{m}_r)(X_j - \bar{m}_r)^T \right] G^T$$

y dado que  $[GX_j]^T = X_j^T G^T$  entonces:

$$\sum r = G \sum X X^T G^T \quad (V.42)$$

donde  $\Sigma_X$  es la matriz de varianza-covarianza de los datos en el espacio x. G es la matriz transpuesta de los vectores característicos de  $\Sigma_X$  con la condición de que esta sea una matriz ortogonal. Del apéndice A se observa que  $\Sigma_Y$  es la matriz diagonal de los valores característicos de  $\Sigma_X$  por lo tanto:

$$\Sigma_y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (V.42)$$

$\Sigma_y$  es por definición una matriz diagonal en la que sus elementos son la varianza de los datos en las coordenadas transformadas respectivas. Los elementos  $\Sigma_y$  están arreglados de tal manera que  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n$ . Así, los datos muestran la máxima varianza en  $Y_1$  (componente principal 1), el siguiente valor de varianza mayor en  $Y_2$  (componente principal 2) y así sucesivamente hasta llegar al valor mínimo de varianza en  $Y_n$ .

Aplicando la transformación de componentes principales a los datos de la figura V.10b con una matriz de varianza-covarianza:

$$\Sigma_x = \begin{bmatrix} 1.90 & 1.10 \\ 1.10 & 1.10 \end{bmatrix}$$

El primer paso para determinar los componentes principales es necesario encontrar los valores y vectores característicos de la matriz de varianza-covarianza. Los valores característicos están dados por la solución de la ecuación característica:

$$|\Sigma X - \lambda I| = 0$$

donde I es la matriz identidad, entonces:

$$\begin{bmatrix} 1.90 - \lambda & 1.10 \\ 1.10 & 1.10 - \lambda \end{bmatrix} \hat{=} \lambda^2 - 3.0\lambda + 0.88 = 0$$

con lo que se obtienen los valores característicos de  $\lambda_1=2.67$  y  $\lambda_2=0.33$ . Por lo tanto la matriz de varianza-covarianza en el sistema coordenado  $y$  (con las componentes principales como ejes) es:

$$\Sigma_y = \begin{bmatrix} 2.67 & 0 \\ 0 & 0.33 \end{bmatrix}$$

Los valores característicos contienen información importante ya que a partir de ellos se puede determinar el porcentaje total de varianza para cada uno de los componentes principales, a partir de la ecuación:

$$\% \text{ var} = \frac{\lambda_p \times 100}{\sum_{p=1}^n \lambda_p} \quad (\text{V.44})$$

donde  $\lambda_p$  es el  $p$ -ésimo valor característico de la matriz de varianza-covarianza.

El segundo paso es obtener la matriz de transformación  $G$ , que es la matriz transpuesta de los vectores característicos de  $\Sigma_x$ . Considerando, el vector característico correspondiente a  $\lambda_1$  que es el vector solución de la ecuación

$$[\sum x - \lambda_1 I] g_1 = 0 \quad (\text{V.45})$$

donde

$$g_1 = \begin{bmatrix} g_{11} \\ g_{21} \end{bmatrix}$$

sustituyendo  $\Sigma_x$  y  $\lambda_1$  en la expresión V.45 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} -0.77 g_{11} + 1.10 g_{21} &= 0 \\ 1.10 g_{11} - 1.57 g_{21} &= 0 \end{aligned}$$

con las que se tiene que el valor de  $g_{11}$  esta dado por:

$$g_{11} = 1.43 g_{21} \quad (\text{V.46})$$

Puesto que la matriz  $G$  tiene que ser ortogonal se requiere normalizar los vectores  $g_{11}$  y  $g_{21}$ , por lo tanto:

$$g_{11}^2 + g_{21}^2 = \quad (\text{V.47})$$

la cual se usa simultáneamente con la ecuación V.46 para obtener el valor de  $g_1$ . Entonces

$$g_1 = \begin{bmatrix} 0.82 \\ 0.57 \end{bmatrix}$$

de manera similar para  $\lambda_2$

$$g_2 = \begin{bmatrix} -0.57 \\ 0.82 \end{bmatrix}$$

por lo que la matriz de transformación  $G$  de componentes principales es:

$$G = \begin{bmatrix} 0.82 & -0.57 \\ 0.57 & 0.82 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.82 & 0.57 \\ -0.57 & 0.82 \end{bmatrix} \quad (\text{V.48})$$

Los resultados anteriores se pueden interpretar como: 1) los vectores  $g_1$  y  $g_2$  son los vectores que definen los ejes de los componentes principales en términos de las coordenadas originales (figura V.12)

De la figura V.12 se observa que los datos en los nuevos ejes no muestran correlación, y que son únicamente una rotación de los ejes originales; 2) aplicando la matriz de transformación  $G$  para encontrar los nuevos valores de brillantez de los pixels en el nuevo sistema coordenado, se tiene que  $Y=GX$  entonces:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.82 & 0.57 \\ -0.57 & 0.82 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (\text{V.49})$$

la cual es la transformación de componentes principales que deberá ser aplicada a la imagen de los datos de la figura V.10b.

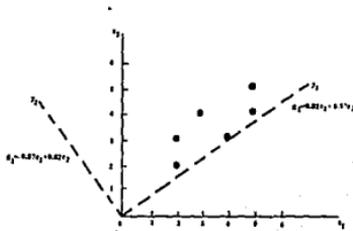


Figura V.12 Ejes de componentes principales para los datos de la figura V.10b;  $e_1$  y  $e_2$  en las direcciones horizontal y vertical respectivamente.

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Para los valores de:

$$X = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

los valores de  $Y$  bajo la transformación de componentes principales serán:

$$Y = \begin{bmatrix} 2.78 \\ 0.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4.99 \\ 0.18 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6.38 \\ 0.43 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6.95 \\ 1.25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4.74 \\ 1.57 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3.35 \\ 1.32 \end{bmatrix}$$

la gráfica de los valores de brillantez de los pixels en el espacio  $Y$  se presenta en la figura V.13. De esta gráfica se puede ver que los datos no muestran correlación entre las componentes principales (ejes), y que la mayoría de los datos se encuentran dispersos en dirección de la primera componente. Lo anterior puede ser interpretado como que esta componente contiene la mayor cantidad de la información de la imagen. Por último, si un par de imágenes de componentes principales son producidas usando los datos de los valores de brillantez  $Y_1$  y  $Y_2$ , la primera componente presenta un alto grado de contraste mientras que la segunda componente muestra un grado de contraste menor. Este efecto es más notable en las últimas componentes de una transformación por componentes principales cuando se considera un número grande de componentes.

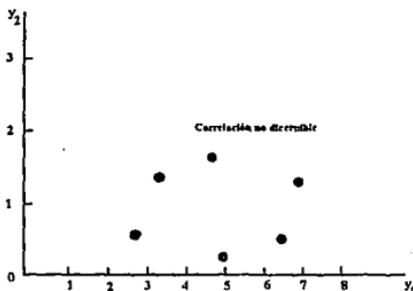


Figura V.13 Ubicación de los píxeles en el espacio decorrelacionado de componentes principales

¿Pero que representan estas componentes?. Si calculamos la correlación de cada una de las bandas que componen la imagen con cada una de las componentes resultantes, es posible determinar como influye cada banda en cada uno de estas componentes a partir de la ecuación:

$$R_{kp} = \frac{a_{kp} \times \sqrt{\lambda_p}}{\sqrt{\text{Var}_k}} \quad (\text{V.50})$$

donde:

$a_{kp}$  = Vector característico de la banda  $k$  y el componente  $p$

$\lambda_p$  =  $p$ -ésimo valor característico (componente)

$\text{Var}_k$  = Varianza de la banda  $k$  en la matriz de varianza-covarianza

El cálculo de la ecuación V.50 da como resultado una nueva matriz conformada por los llamados *factores de peso*

### **Matriz de correlación**

Hasta ahora se ha utilizado la matriz de varianza-covarianza de los datos de las imágenes para el cálculo de las componentes principales. Sin embargo, es posible calcular los valores y los vectores característicos y por lo tanto la matriz de transformación, si se emplean los datos estandarizados de las imágenes en cuyo caso la matriz de varianza-covarianza será la matriz de correlación.

Los valores en la diagonal principal de la matriz de correlación son iguales a 1 (Ver Sección V.5.1), dado que las nuevas variables estandarizadas tienen varianza unitaria. Esto significa que a los conjuntos de datos (variables), a partir de las cuales se generan los componentes principales, se les otorga la misma importancia. Es importante destacar que el uso de la matriz de correlación implica una ponderación de las variables originales, otorgándole a cada una la misma importancia, independientemente de los valores relativos de sus varianzas.

Cuando se utiliza la matriz de correlación, cambian algunas de las propiedades de los valores y vectores característicos esto es:

$$\sum_{i=1}^p \text{Var} [Y_i] = \text{tr } R \quad (\text{V.51})$$

donde  $R$  es la matriz de correlación.

Dado que la matriz de correlación  $R$  presenta únicamente unos en la diagonal principal y es de dimensión  $p$  entonces:

$$\prod_{k=1}^p \text{Var} [Y_k] = |R| \quad (\text{V.52})$$

por lo tanto, la matriz de transformación de componentes principales generada a partir de la matriz de correlación, será diferente de la obtenida a partir de la matriz de varianza-covarianza.

En el contexto de las imágenes digitales se puede usar tanto una matriz estandarizada como no estandarizada. El uso de la forma estandarizada se justifica por las posibles diferencias en la resolución radiométrica entre las bandas del sensor.

Singh y Harrison (1985) concluyen que el uso de la matriz de correlación en la transformación de componentes principales mejora de manera significativa la relación señal-ruido y el realce de la imagen. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que si los elementos fuera de la diagonal principal de la matriz de correlación son aproximadamente iguales, la interpretación a partir del análisis de componentes principales será incierta (Seal, 1964).

### *Composición de color*

La técnica de composición de color convierte imágenes blanco y negro a imágenes en color, en las que cada uno de los colores representa una banda de la imagen original. El proceso se basa en el mismo fenómeno de percepción de colores que se da en el ojo humano: éste posee tres clases de receptores fisiológicos, sensibles a cada uno de los colores primarios -rojo, verde y azul-, de modo que la luz de otros colores se percibe en función de la proporción de colores básicos que se dividen entre estos tres tipos de receptores. En la composición en color de las imágenes multiespectrales, el análogo de los receptores fisiológicos son las bandas espectrales que componen la imagen. Así, registrando cada color por separado y mezclándolos en una proyección se reproducen las imágenes en color.

Las composiciones en color son útiles para representar con un color en particular materiales específico, cuya intensidad es proporcional a los valores de brillantez contenidos presentes en la imagen.

### *Álgebra de bandas*

Dependiendo de la aplicación algunas veces se usan simples operaciones aritmética como la *suma*, *sustracción*, *multiplicación* y *división* de los valores de brillantez de dos bandas para formar una imagen.

La diferencia es usada en regiones con cambios sobresalientes entre dos imágenes de la misma área. La imagen resultante es rescalada para remover los valores de brillantez negativos. Normalmente, en la imagen diferencia las regiones donde no existen estos cambios aparecen en gris, en tanto las regiones con cambios sobresalientes aparecen

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

brillantes u oscuras dependiendo del signo de la diferencia. Esta característica de la imagen diferencia es usada frecuentemente para el realce de bordes. La expresión de la imagen diferencia es:

$$B_{ijl} = I^*B_{jk} - VB_{ijl} \quad (V.53)$$

donde  $VB_{ijl}$  es el valor de salida de la diferencia para el pixel del renglón  $i$  columna  $j$ .  $VB_{ijk}$  es el valor del pixel en la posición  $ij$  en la banda  $k$  y  $VB_{ijl}$  es el valor del pixel en la posición  $(i,j)$  en la banda  $l$ .

La suma de las bandas de una imagen es usada principalmente para fusionar información de dos imágenes. La suma de bandas se obtiene apartir de:

$$B_{ijl} = VB_{jk} + VB_{ijl} \quad (V.54)$$

donde  $VB_{ijl}$  es el valor de salida de la suma para el pixel del renglón  $i$  columna  $j$ .  $VB_{ijk}$  es el valor del pixel en la posición  $ij$  en la banda  $k$  y  $VB_{ijl}$  es el valor del pixel en la posición  $ij$  en la banda  $l$ .

## CAPITULO VI

### ÁREA DE ESTUDIO

#### VI.1 INTRODUCCIÓN

La exploración del área estudio, tiene como objetivo principal, la localización y delimitación 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 optimación de tiempo y de los recursos tanto económicos como humanos.

#### VI.2 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 (Ver Sección III.7, figura III.3), 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.

##### VI.2.1 Localización, vías de acceso y clima

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  $20^{\circ}53'$  y  $21^{\circ}12'$  de latitud norte y los meridianos  $104^{\circ}20'$  y  $104^{\circ}38'$  de longitud oeste con una superficie de  $1165.824 \text{ Km}^2$  ( $30.72 \times 37.95 \text{ Km}$ ) (figura VI.1).

Las principales vías de acceso son la carretera federal No. 15 que cruza el área de SE a NW y la línea férrea del Pacífico en su tramo Guadalajara-Tepic. Existen además caminos de terracería transitables todo el año, así como brechas utilizables sólo en tiempos de cosechas.

El clima varía de semicálido a subhúmedo, con una precipitación anual de 800 a 1200 mm y una temperatura media anual de  $22^{\circ}\text{C}$ . La cobertura vegetal del área es muy densa y se encuentra relacionada a la topografía; en las partes altas se presentan árboles pequeños, matorrales de encinos bajos (chaparral) en las partes intermedias a bajas. Las zonas de cultivo se localizan en los valles.

## ÁREA DE ESTUDIO

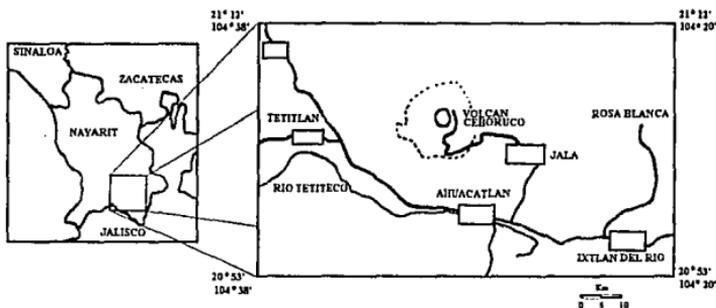


Figura VI.1 Localización del área de estudio

### VI.2.2 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 (Ponce y Clark, 1988). 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 1500 a 2500 m.s.n.m. encontrándose elevaciones de más de 3000 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 (Loucks et al., 1988). 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 (Loucks et al., 1988).

La provincia del Eje Neovolcánico constituye una franja compuesta principalmente por rocas volcánicas de composición andesítica y dacítica del Mioceno al

## ÁREA DE ESTUDIO

Holoceno (Gunn y Mooser, 1970). Tiene una área aproximada de 185,160 Km<sup>2</sup> (Salas, 1975) y una longitud de 1000 Km. El Eje Neovolcánico cruza la República Mexicana en dirección E-W entre los paralelos 19<sup>o</sup> y 21<sup>o</sup> 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 (Damont, 1978).

### VI.2.3 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 1500 a 2740 m.s.n.m. a partir del Valle de Jala. Hacia la sur las rocas de esta provincia se encuentran intrusionadas por cuerpos graníticos, metamorfizadas y plegadas con elevaciones de 1000 a 2320 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 1100 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 2880 m.s.n.m. y conos cineríticos los cuales se localizan como conos satélites de los estratovolcanes o aislados, pero siempre alineados a ellos.

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 VI.2). A continuación se describen las características litológicas de las diferentes unidades presentes en el área partiendo de la más antigua.

### *Secuencia Terciaria*

*Andesitas*.- Esta unidad es considerada la base de la Sierra Madre Occidental, con una edad del Oligoceno Medio-Mioceno Inferior (Romero et al., 1991). Los afloramientos de esta unidad se restringen a una pequeña porción del cauce del río Grande Santiago al NE

## ÁREA DE ESTUDIO

(fuera del área de estudio), constituida por gruesos paquetes de andesitas cloritizadas con un intenso fracturamiento.

**Ignimbritas.**- Esta secuencia está compuesta por un grueso paquete ignimbritico de composición riolítica de color rosáceo con abundantes fenocristales de cuarzo y feldespatos, matriz vítrea y textura porfídica (Romero et al., 1991). Las ignimbritas afloran ampliamente (cubren casi las dos terceras partes del área de estudio) en las porciones N-NE y S-SE, con espesores del orden de 900 a 1000 m y una edad que varía del Oligoceno Medio al Mioceno Inferior (Nixon et al., 1987). Estratigráficamente sobreyacen a los depósitos Pliocuaternarios.

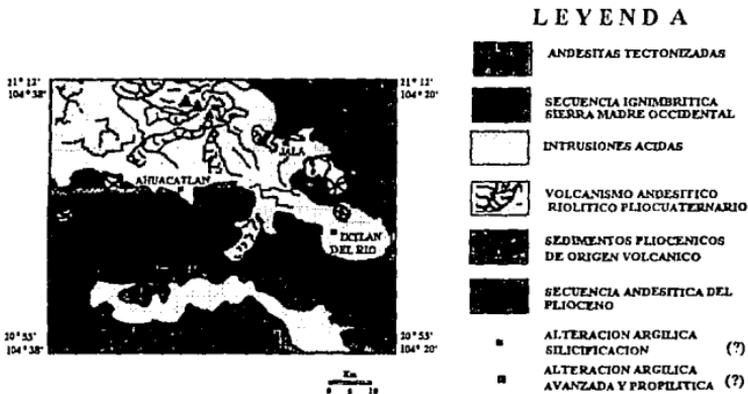


Figura VI.2 Mapa geológico simplificado y zonas de alteración del área del Ceboruco. (Tomada de: Romero, et al., 1991).

**Rocas intrusivas ácidas.**- Hacia la porción sur del área (Sierra El Guamuchil) se reconocieron eventos de tipo intrusivo. Dichos cuerpos ocasionaron alteraciones de tipo hidrotermal en las rocas intrusionadas, así como metamorfismo de contacto. Su composición es de tipo granodiorítico con variaciones a monzonita, tonalita y granito. Las edades obtenidas para estos cuerpos por Gastil (1976) son de 61.8 m.a. y de 40.8 m.a., en el área de El Pílon y Barranca del Oro respectivamente.

**Unidad Metavolcánica.**- Esta unidad se encuentra restringida a las zonas donde se presentan eventos de tipo intrusivo los cuales ocasionaron metamorfismo de contacto de bajo grado; aflorando en los flancos de la Sierra el Guamuchil. Esta secuencia de rocas

## ÁREA DE ESTUDIO

metamórficas está clasificada como meta-andesita (Delgado, et al., 1978), con textura afanítica y pseudoestratificación con tonos verdes y rojizos. Las rocas se encuentran fuertemente fracturadas con vetillas rellenas de cuarzo y cristales de pirita, así como mineralización de oro en el área de El Pilón y Barranca del Oro.

### *Secuencia Plio-Cuaternaria*

*Andesitas y Riolitas.*- Esta unidad aflora principalmente en la parte central del área (sobreyaciendo a la secuencia ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental), en la margen norte de la Sierra El Guamuchil, así como en la parte norte del Valle de Jala. En su mayor parte esta secuencia está compuesta por derrames andesíticos, aunque en algunas zonas fuera de la región de estudio se han reconocido cuerpos de composición riolítica (San Marcos y Santa María del Oro).

Este volcanismo está compuesto por derrames andesíticos de tipo fisural. Las andesitas son de color gris oscuro, textura afanítica y porfídica, con presencia de lajamiento y en algunas zonas con fracturamiento (Romero et al., 1991). Los fechamientos para esta unidad dieron una edad de 8.7 m.a. (Mioceno Superior-Plioceno Superior) (C.F.I.F. Proy. Aguamilpa, 1979).

*Material Volcano-sedimentario.*- Hacia el Valle de Amatlán de Cañas, se observan gruesos paquetes de material volcano-sedimentario compuesto por fragmentos de andesitas, tobas y rocas graníticas de edad Plio-cuaternaria. Sobreyaciendo a estas rocas se observan derrames de basaltos de probable edad Cuaternaria (Romero et al., 1991).

*Unidad Volcánica del Cuaternario.*- Esta unidad está compuesta principalmente por productos volcánicos de composición calci-alcalina, emitidos por los estratovolcanes como el San Pedro, Tepelitic, Sanganguey, Navajas, San Juan y Ceboruco (este último se localiza dentro del área de estudio). Estos volcanes se encuentran alineados en una zona de debilidad cortical con orientación NW-SE, donde se encuentran principalmente andesitas, dacitas y riolodacitas (Romero et al., 1991). Nelson (1980) reporta una edad de 1500±80 años de la Toba Marquezado producto de la primera erupción del Volcán Ceboruco; reporta también riolodacitas (serie calci-alcalina) de la última erupción ocurrida en 1870.

### **VI.2.4 Ambiente Tectónico**

La composición química de los productos volcánicos en la región es de la serie calci-alcalina, típica de un ambiente tectónico de subducción. Nixón y colaboradores (1987) atribuyen el volcanismo a la subducción de la Placa Rivera y la parte norte de la Placa de Cocos. Asimismo, se han reportado composiciones alcalinas, típicas de ambientes distensivos, producto del movimiento con fallamiento lateral asociado al mecanismo que provoca la separación del Golfo de California (Luhr et al., 1985).

## ÁREA DE ESTUDIO

La hipótesis acerca de la tectónica regional del Pacífico (Atwater, 1970) y la apertura del Golfo de California (Demant, 1977), sugiere para esta región cuatro diferentes épocas de actividad volcánica (Tabla VI.1).

**Tabla VI.1 Épocas Volcánico-Tectónicas de la región de Tepic-Ixtlán del Río, Nayarit.**

<b>ÉPOCA I</b>	Oligoceno-Mioceno Temprano	Sierra Madre Occidental	Ignimbritas, andesitas, riolitas y basaltos Con edades entre 34.6 y 13.6 m. a.
<b>ÉPOCA II</b>	Mioceno Inferior		Basaltos Con edad de 8.7 m.a.
<b>ÉPOCA III</b>	Plioceno	Volcanismo base del Eje Neovolcánico	Riolita, andesitas y basaltos Con edades entre 4.5 y 2.3 m. a.
<b>ÉPOCA IV</b>	Plioceno-Holoceno Reciente	Volcanismo del sector occidental del Eje Neovolcánico	Riolitas, dacitas, andesitas y tobas Con edades entre 1.6 m.a. y 120 años

(Tomada de: Romero, et al., 1991).

Las épocas I y II corresponden a la subducción de la placa Farallón (fase compresiva) y al inicio de la apertura del Golfo de California (fase distensiva); en tanto que las épocas III y IV corresponden a la continuación de la apertura del Golfo de California y a los movimientos de subducción de la Placa de Cocos (Romero et al., 1991).

Las estructuras que han actuado en el área afectan tanto a las rocas de la secuencia de la Sierra Madre Occidental, como a las Plio-cuaternarias. Las rocas de la Sierra Madre Occidental presentan un fracturamiento regional en dirección NW-SE (cañón del río Grande Santiago), el cual constituye el límite norte del graben Tepic-Chapala. El límite sur está definido por la Sierra de Jolapa y Zapotlán (fuera del área de estudio), en tanto que la Sierra El Guamuchil sería el resultado de un levantamiento provocado por eventos tectónicos, quedando como un cuerpo discordante (Romero et al., 1991; Luca Ferrari, et al. 1993). Los límites volcánicos del graben Tepic-Chapala están definidos al norte por los aparatos y derrames volcánicos que se alinean a lo largo de una estructura NW-SE. El límite sur está definido por el volcanismo Plio-cuaternario que cubre las rocas de la Sierra Madre Occidental en dirección NW-SE.

De las observaciones de campo se puede pensar que el volcanismo en la región aprovecha las zonas de debilidad formadas por el cruce de los dos principales patrones estructurales (NW-SE y NE-SW), que al parecer actúan como un par de fallas conjugadas formando estructuras tensionales (grabens o cuencas).

### VI.2.5 Tectónica local

El área de estudio se caracteriza por la presencia de las depresiones tectónicas del Ceboruco y Amatlán de Cañas que presentan estructuras de semi-graben limitados por fallas listricas. La depresión del Ceboruco está formado por una falla normal listrica 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

## ÁREA DE ESTUDIO

VI.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 listrica de dirección N150E en su parte oriental y N80E en la parte occidental. Esta estructura hunde casi 1000 m el bloque meridional que está basculado en un promedio de 20° al NNE (figura VI.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).

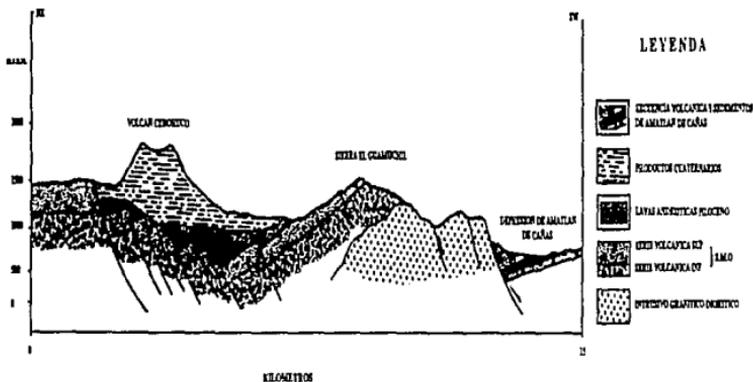


Figura VI.3 Sección geológica esquemática entre el volcán Ceboruco y Amatlán de Cañas. (Tomada de: Ferrari et al., 1993).

### VI.2.6 Alteración hidrotermal

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 VI.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 (1300 m.s.n.m.). A los 1220 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 (1215 m.s.n.m.); en rocas andesíticas se presenta alteración argílica avanzada (?) color rojo con pocos cristales de epidota (1250 m.s.n.m.). Sobre planos de falla con rumbo N30E se tiene alteración propilitica en andesitas (?) con vetas de cuarzo oxidadas de unos cuantos milímetros hasta 10 a 15 cm de espesor. A los 1055 m.s.n.m. se presenta alteración propilitica (?) con abundante clorita y silicificación. En esta zona (Sierra El Guamuchil) la alteración se presenta generalmente relacionadas con las estructuras NW-SE

### VI.2.7. Mineralización

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 con 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 esta 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

### VI.3 CRITERIOS DE EXPLORACIÓN

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 los efectos de alteración hidrotermal son más relevantes 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 185x185 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.

10-05

## CAPITULO VII

# PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

### VII.1 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO

El procesamiento de los datos de percepción remota fue limitado a una subimagen de 1024x1265 pixels (aproximadamente 116.824 Km<sup>2</sup>) del cuadrante SW de la imagen Thematic Mapper (TM) (Path 030 Row 045) adquirida por el Landsat 5 en abril de 1991. Esta subimagen será referida con el nombre de imagen Ceboruco.

El procesamiento de la imagen Ceboruco fue realizado en una computadora Acer Power 80486DX a 33 MHz con coprocesador matemático, 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). Las imágenes procesadas fueron grabadas en diskettes de 3.5" de 1.4 Mb e impresas en fotografías y diapositivas usando una cámara fotográfica de 35 mm.

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.

#### VII.1.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico de la imagen Ceboruco se realizó a partir del cálculo de las estadísticas univariadas y multivariadas (Ver Sección V.4.1) de las bandas contenidas en la imagen.

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

PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

Tabla VII.1 Estadísticas univariadas y multivariadas de las 6 bandas no térmicas de la imagen Ceboruco

No. de Bandas	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Media	88.29	38.85	52.78	60.31	111.04	54.89
Des. Estandar	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 VII.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 (Ver Sección V.4.3). 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 (Ver Sección V.4.3).

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.

### VII.1.2 Preprocesamiento

Para corregir los errores generalmente presentes en las imágenes de percepción remota (Ver Sección V.4.3), 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 determinaron las bias para cada banda a partir del análisis de las estadísticas univariadas de la Tabla VII.1 y se aplicó la ecuación V.4 para la corrección de los datos que componen las imágenes. Los valores máximos y mínimos de las imágenes originales y corregidas son mostrados en la Tabla VII.2.

Tabla VII.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	36	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.

### VII.1.3 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) (Ver Sección IV.5.2). 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

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

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 sub juego 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.

### VII.1.3.1 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 imperismo.

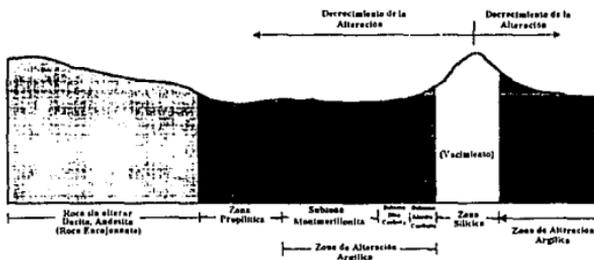


Figura VII.1 Modelo de una sección de la zona de alteración de un sistema hidrotermal típico (Tomada de: Sabins, 1987; Ashely, 1974).

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

Otro aspecto importante de la alteración es su zonificación (figura VII.1). 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 VII.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 (ver Sección IV.4.3).

**Tabla VII.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, Pirotilita, Hematita, Ankerita, Calcita*, Montmorillonita, Zeolita, Epidota*, Clorita*
Argílica	Sericita*, Caolinita*, Montmorillonita*, Calcita*, Pirita, Biotita*, Clorita*
Filica	Sericita*, Topacio, Turmalina
Argilización Avanzada	Sericita*, Alunita*, Pirofilita*, Pirita
Potásica	Sericita*, Anhidrita*, Calcita*, Ankerita, Pirita, Biotita*, Feldespatos-K, Hematita, Siderita*, Clorita*

\*Minerales con rasgos espectrales en el infrarrojo cercano y medio

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  $\mu\text{m}$ ), así como de los minerales de la Tabla VII.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.

La región de El Ceboruco esta constituida en su mayor parte por rocas de origen ígneo (Ver Sección VI.4.2) y en algunas localidades estas rocas han sido alteradas por fluidos hidrotermales (Ver Sección VI.2.7). 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 Pílon, 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

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

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 (Ver Sección VI.2.7) ayuda en la localización de estas, dado que estos minerales afectan fuertemente la porción de 0.4 a 1.1  $\mu\text{m}$  de la región del visible e infrarrojo cercano (VIRc). La figura VII.2 muestra los rasgos espectrales debido a transiciones electrónicas (Ver Sección IV.4.3.1) de los minerales de hierro que se presentan comúnmente en las rocas alteradas en el rango de 0.35 a 1.5  $\mu\text{m}$  (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  $\mu\text{m}$ ; 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  $\mu\text{m}$  y un mínimo que ocurre generalmente en 0.85  $\mu\text{m}$ . La presencia de anomalías de reflectancia en la banda cerca de 0.9  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$ , el mineral predominante es generalmente hematita. Si la anomalía está centrada en 0.9  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$ .

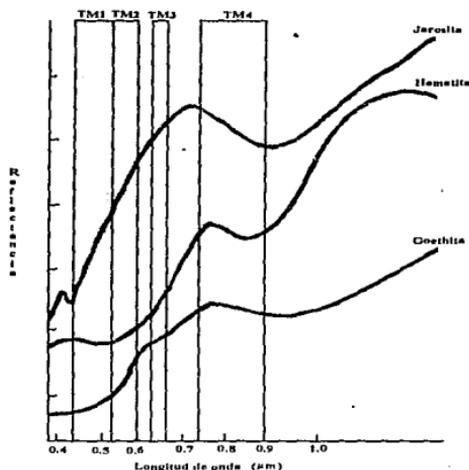


Figura VII.3 Curvas de reflectancia espectral de minerales formadores de hierro

Las transiciones vibracionales (Ver Sección IV.4.3.1) que se presentan en la región entre 1.1 y 2.5  $\mu\text{m}$  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, filossilicatos, etc) alrededor de 1.65  $\mu\text{m}$ , y por fuertes rasgos de absorción para la banda centrada alrededor de 2.2  $\mu\text{m}$  (Goezt y Rowan, 1981) (figura VII.3).

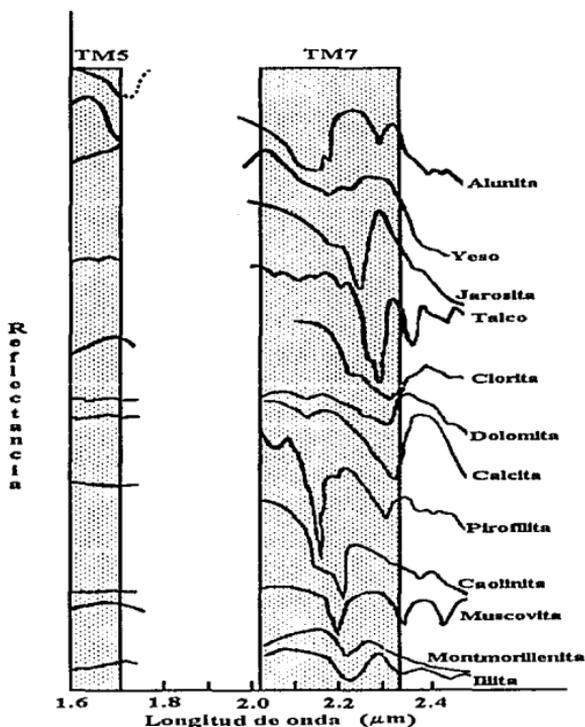


Figura VII.3 Curvas de reflectancia espectral de minerales arcillosos, filossilicatos, carbonatos y sulfatos

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

La vegetación presenta rasgos de absorción de 0.45 a 0.68  $\mu\text{m}$  y alta reflectancia en el infrarrojo cercano llamada *meseta*. Los rasgos de reflectancia en 1.6  $\mu\text{m}$  y 2.2  $\mu\text{m}$  indican el contenido de agua en las hojas. Los rasgos de absorción alrededor de 1.4  $\mu\text{m}$  y 1.9  $\mu\text{m}$  son debido a la presencia de agua en las hojas (figura VII.4) al igual que los minerales que contienen moléculas de agua en sus estructura.

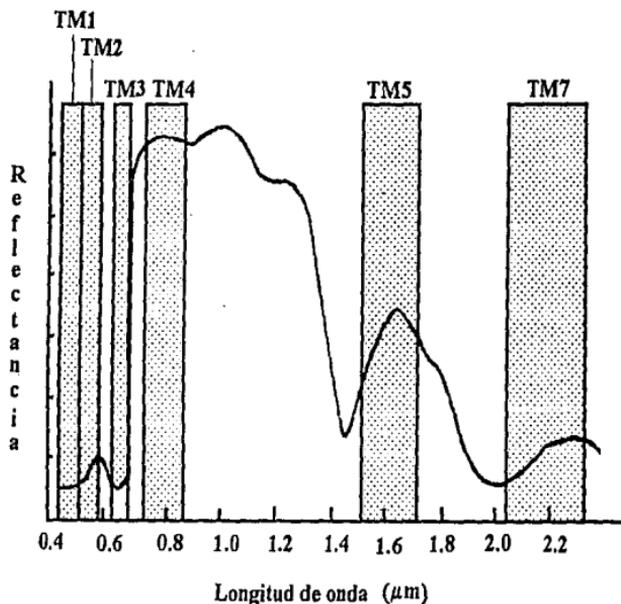


Figura VII.4 Curvas de reflectancia espectral de la vegetación

Del análisis de las figuras VII.2, VII.3 y VII.4 se observa que la región cubierta por la banda TM3 (0.63-0.69  $\mu\text{m}$ ) presenta una alta reflectancia para los minerales 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  $\mu\text{m}$ ) incluye el llamado "límite rojo" que es un rasgo de gran reflectancia característico de la vegetación (Ver Sección IV.4.3.2), así como la banda de absorción de los minerales de hierro en 0.90  $\mu\text{m}$  lo que produce una

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

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  $\mu\text{m}$ ) y TM2 (0.52-0.60  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$ ) y TM7 (2.08-2.35  $\mu\text{m}$ ) 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 VII.4 resume las características de reflectancia para óxidos de hierro, hidróxilos y vegetación obtenidas a partir del análisis de sus curvas espectrales.

Tabla VII.4 Características espectrales para óxidos de hierro, hidróxilos y vegetación

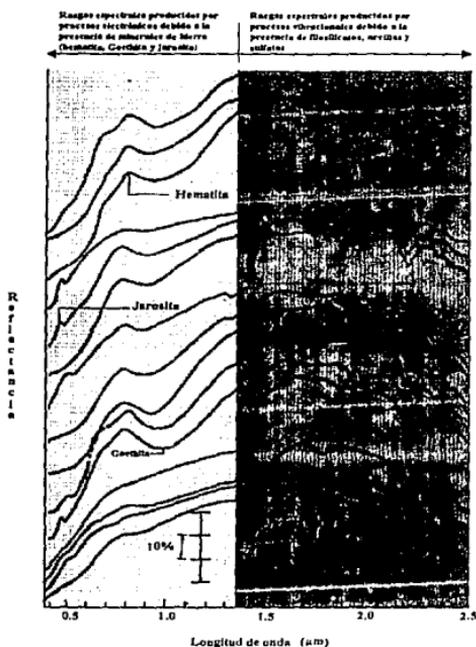
MATERIALES	REFLECTANCIA	ABSORCIÓN
MINERALES ARCILLOSOS, CARBONATOS, FILOSILICATOS Y SULFATOS	TM5*	TM7*
HEMATITA	TM3	TM2* TM1
GOETHITA	TM3* TM2	TM1
JAROSITA	TM3* TM2 TM1	
VEGETACIÓN	TM4* TM2 TM5 TM7	TM3 TM1

\* Bandas con los rasgos espectrales más característicos

No obstante, el ancho de las bandas del 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.

La figura VII.5 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).

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO



**Figura VII.5** Espectro de rocas clasificadas con alteración argílica avanzada en el rango espectral de 0.35 a 2.5  $\mu\text{m}$ . 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 debido al grupo de los óxidos (hematita, goethita y jarosita). Los espectros son desplazados verticalmente y arreglados de acuerdo a la similitud de cada uno de ellos. (Tomada de: Hunt y Ashley, 1979).

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. Las técnicas de *Análisis de Componentes Principales Dirigidas* (ACPD), *Técnica de Crosta* (*Análisis de Componentes Principales Orientadas*) basadas en la técnica de *Análisis Selectivo de Componentes principales* desarrollada por Chavez Jr. y Yaw Kwarteng (1989) fueron aplicadas para separar la respuesta de los óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación y la composición en color de las componentes resultantes. La

selección de las bandas para el análisis de componentes principales se hizo en base a las características espectrales enunciadas en la Tabla VII.4.

### *Análisis Selectivo de Componentes Principales*

La diferencia entre el Análisis Estandar de Componentes Principales y el Análisis Selectivo de Componentes Principales es que en el análisis estandar 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 subjuego 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 realzar 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 interpretado 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 (Ver Sección V.4.4.3). Si el Análisis de Componentes Principales Estandarizado (Ver Sección V.4.4.3) 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 atraviese los cúmulos no representativos 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 VII.4).

El dispersograma de los cocientes de bandas TM3/TM1 y TM4/TM3 (figura VII.6) presenta características que indican que estos cocientes pueden ser utilizados 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 VII.4, Tabla VII.4) en contraste con la caída de la pendiente de reflectancia en la parte del visible (banda TM3) (Ver figura VII.4, Tabla VII.4) debido a la absorción de la clorofila (Kaufmann, 1988). De las características espectrales tanto de la hematita como de la goethita (Ver figura VII.1, Tabla VII.4) hace 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 hierro y la vegetación por los cocientes usados en ACPD, el dispersograma de estos cocientes presentará valores bajos en el eje de las abscisas (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

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

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.

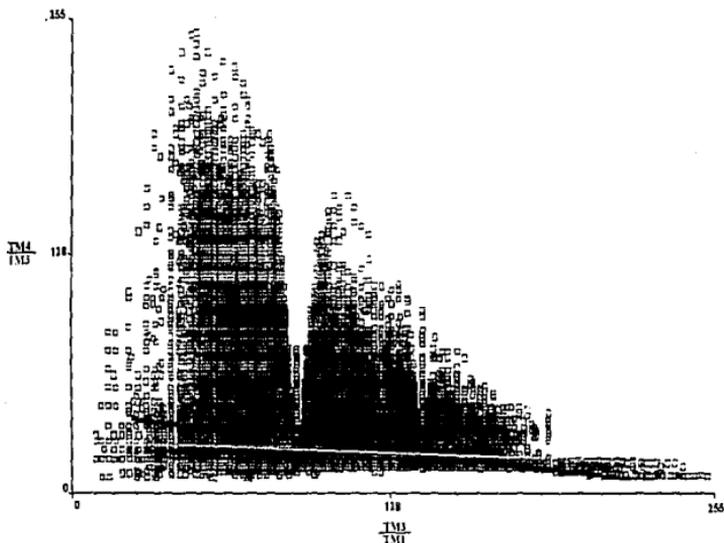


Figura VII.6 Dispersograma del espacio  $TM3/TM1$  vs  $TM4/TM3$

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 VII.5.

De los valores característicos del ACPD (Tabla VII.5) se tiene que el 60.46% de la varianza es mapeado en la CPD1 y el restante 39.54% en la CPD2. La dirección de los vectores característicos superpuesto sobre los campos de la hematita, goethita y vegetación son dibujados en la figura VII.7.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

Tabla VII.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	-0.91
TM4/TM3	-0.91	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 la figura VII.7 se puede inferir que la imagen CPD1 contendrá la información concerniente a los óxidos de hierro; la hematita se mapeará en tonos oscuros mientras que la goethita en tonos brillantes. La imagen CPD2 mapea las área con una alta densidad de vegetación en tonos brillantes y las área con una densidad baja en tonos oscuros.

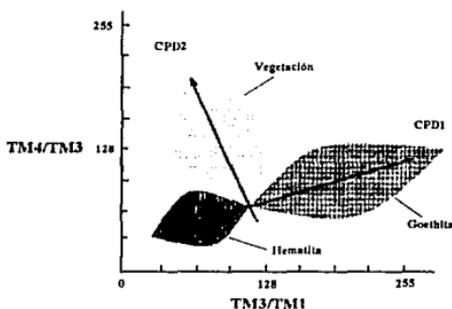


Figura VII.7 Dirección de los vectores característicos de la imagen Ceboruco

La composición en color de las componentes dirigidas se muestra en la figura VII.8. En rojo la imagen CPD1, verde la imagen CPD2 y en azul la imagen inversa de CPD1 (para representar la hematita en tonos brillantes). En esta composición de color la goethita es roja, la hematita azul y en amarillo la mezcla de vegetación y goethita.

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO



Figura VII.8 Composición en color de las imágenes del ACPD para el mapeo de distribución de óxidos de fierro y vegetación sobre el área del Ceboruco. Goethita (rojo), Goethita+Vegetación (amarillo) y Hematita (azul). (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

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

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

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

La Tabla VII.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.

Tabla VII.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	1496.52	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

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 contribución de la banda TM4 (92.64%). Dado que la vegetación presenta una reflectancia alta en la banda TM4, los píxels con información acerca de la vegetación se presentan en tonos brillantes en esta componente. Los vectores característicos de la componente principal 3 (CP3) revela que esta es similar a la CP1, con una contribución balanceadas en algunas bandas. Los vectores característicos de las componentes principales CP4, CP5 y CP6 revelan que estas contiene información espectral relacionada con óxidos de hierro e hidroxilos.

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 VII.9). 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 las características espectrales de los óxidos de hierro (Tabla VII.4), estos serán mapeados en tonos oscuros en CP5. Para mapear los óxidos en

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

tonos brillantes se obtuvo la imagen inversa de CP5 (Óxidos) (figura VII.10). 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.

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 hierro así como la vegetación son mapeados en las imágenes de las componentes principales siguientes: los hidroxilos son oscuros en CP4, los óxidos de hierro 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 anómalas de hidroxilos y óxidos de hierro 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 VII.11).

Las imágenes de Óxidos (*O*), Óxidos+Hidroxilos (*O+H*) e Hidroxilos (*H*) en los que los pixels brillantes son realzados favorablemente, fueron combinadas para formar la composición en color *H* (rojo), *O+H* (verde) y *O* (azul), porque el ojo humano es más perceptivo a los tonos rojos que a los tonos azules y las condiciones de la superficie (p.e. argilización y propilitización) medidas por la imagen *H* son áreas anómalas de interés para la exploración mineral especialmente cuando estas anomalías se relacionan a afloramientos o suelos residuales (Loughlin, 1991). Además, virtualmente todas las rocas y suelos son afectados por coloraciones de óxidos en mayor o menor grado y la imagen de óxidos es precisamente una medición de la intensidad de estas coloraciones a través del área cubierta por la imagen. La composición a color (en la cual las zonas de alteración son brillantes) puede ser interpretada como: las áreas blancas dentro de las zonas de alteración son áreas con mayor potencial minero, porque contienen tanto óxidos como hidroxilos, las zonas en tonos rojizos a naranja contienen más hidroxilos y las zonas de color cian a tonos azulados están más oxidadas (figura VII.12).

Sin embargo dentro del área las rocas alteradas presentan una coloración de óxidos muy fuerte como lo muestra el ACPD y los trabajos de campo (Ver Sección VI.2.6) en su mayor parte debido a alteración supergénica. Esta "mezcla" hace que los pixels tengan una mayor reflectancia en la banda TM7 que en la banda TM5; lo que ocasiona que se pierda o se destruya la respuesta de los hidroxilos en el infrarrojo medio (banda TM7) por la superposición de la respuesta de óxidos de hierro. Esta combinación de oxidación y alteración puede ser reconocida en la imagen de hidroxilos (figura VII.9) por pixels muy oscuros a negros que se encuentren asociados con pixels brillantes o en la composición a color por pixels negros o de color azul muy oscuro también en asociación con los colores de alteración (rojo y blanco) (figura VII.12).



Figura VII.9 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.



Figura VII.10 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.



**Figura VII.11** 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.



Figura VII.12 Composición de color de las imágenes H (rojo), H+O (verde) y O (azul). Las áreas blancas dentro de las zonas de alteración son áreas con mayor potencial minero (hidroxilos + óxidos), las zonas en tonos rojizos a naranja contienen más hidroxilos y las zonas de color cian a tonos azulados están más oxidadas. (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.

*Técnica de Crosta con cuatro bandas para el mapeo de óxidos de hierro*

Para el mapeo de óxidos de hierro se eligieron las bandas TM1, TM3 y TM5 de acuerdo a las características de reflectancia enunciadas en la Tabla VII.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 VII.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 VII.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	-1196.86	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

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 óxidos de hierro es reproducida en la figura VII.13.

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

La Tabla VII.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 VII.4. Las bandas 2 y 3 son omitidas del análisis para evitar el mapeo de óxidos de hierro.

Tabla VII.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	1298.50	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 muestran que esta componente está dominada por la vegetación y el signo positivo nos indica que la vegetación es mapeada en tonos brillantez. 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 VII.14.

Las imágenes monocromáticas de las concentraciones anómalas de óxidos de hierro e hidroxilos producidas por el Análisis de Componentes Principales de cuatro bandas (figura VII.13 y 14) 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 VII.15). La composición en color de las imágenes de las componentes principales de cuatro bandas se realizó siguiendo el mismo criterio utilizado de la composición en color de las componentes resultantes del análisis de seis bandas e interpretadas de manera similar. La figura VII.16 muestra la composición en color de las imágenes  $H$  en rojo,  $O+H$  en verde y  $O$  en azul.



Figura VII.13 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.



**Figura VII.14** Imagen de hidroxilos ( $H$ ) resultante del ACP de cuatro bandas. Las concentraciones anómalas de hidroxilos son representadas por pixels brillantes. (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.



Figura VII.15 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 Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.



**Figura VII.16** Composición en color de las imágenes H (rojo), H+O (verde) y O (azul) del ACP de cuatro bandas. Las áreas blancas dentro de las zonas de alteración son áreas con mayor potencial minero (hidroxilos + óxidos), las zonas en tonos rojizos a naranja contienen más hidroxilos y las zonas de color cian a tonos azulados están más óxidadas. (A) Sierra El Guamuchil, (B) Sierra Madre Occidental y (C) Volcán Ceboruco.

### VII.1.3 2 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 oscuros; 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 filtrado 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 rescalada 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, rescalado la suma dentro del rango de 0 a 255.

El filtrado espacial se realizó por medio de procesos de convolución con ventanas de  $3 \times 3$ . El proceso empleado se seleccionó de acuerdo al tiempo de cómputo empleado por los procesos disponibles y al tamaño de la imagen (Ver Sección V.4.4.2), en tanto que el

tamaño de la ventana a la resolución del sensor en relación a la topografía y a la complejidad del terreno (Chavez y Bauer, 1982). La imagen seleccionada para llevar a cabo el filtrado espacial fue la componente principal 1 (CPI) 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 empleo un filtrado por medio de la mediana (Ver Sección V.4.4.2). 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 VII.9.

Tabla VII.9 Ventanas utilizadas en este estudio para enfatizar las diferencias direccionales y no direccionales de los valores de brillantez de la imagen Ceboruco.

$$\begin{array}{ll}
 (1) & L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & (2) & L_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\
 (3) & NE = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} & (4) & NW = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \\
 (5) & SW = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & (6) & SE = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

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 (Ver Sección V:4.4., Figura V.7); 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 (Ver Sección 4.4.2, Figura V.8).

Las ventanas 3, 4, 5 y 6 son filtros direccionales de Prewitt. Las direcciones de filtrado se seleccionaron en base a los patrones de fallamiento reportados para el área y en las observaciones de campo (Ver Sección VI.2.5 y VI.2.6). 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.

La figura VII.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 dentrítico 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 calderas 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.

La imagen de la CP1 filtrada por medio del Laplaciano de la ventana 2 (figura VII.18) muestra también el patrón dentrítico, aunque si bien este no es tan acentuado como en la figura VII.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 Pílon así como el cruce de lineamientos en la parte superior de dicha estructura; hacia la parte NE de la misma área de El Pílon se observan rasgos circulares concéntricos. También se puede observar la estructura circular de la figura VII.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 VII.18 es la buena calidad visual que presenta, lo que hace que esta sea más apropiada para la interpretación visual que la imagen de la figura VII.17.

La figura VII.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 VII.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 tiene lineamientos muy extensos (como los que se pueden observar en la parte NE de ambas imágenes) que limitan los afloramientos de los materiales basálticos de el Volcán Ceboruco. De la interpretación visual de las imágenes de las figuras VII.19 y 20 se puede inferir que la Sierra El Guamuchil constituye un horts con dos grabens al norte y al sur. El horts que forma la Sierra El Guamuchil esta 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 VI.3. A nivel local en el área de El Pílon y el Molinetes el patrón predominante es el NE-SW y en área de Jala-Jomulco y Rosa Blanca el NW-SE.



Figura VII.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.

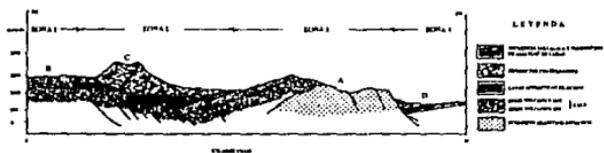


Figura VII.18 Realce espacial Laplaciano (ventana 2) de la primera componente (CP1) de las bandas reflectivas de la imagen Ceboruco, donde se muestran las zonas estructurales obtenidas del análisis de lineamientos y su correlación con el modelo propuesto por Ferrari et al. (1993). (A) Sierra El Guamuchil,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

PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO



Figura VII.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 Ferrari et al. (1993). (A) Sierra El Guanuchil, (B) Sierra Madre Occidental, (C) Volcán Ceboruco y (D) Depresión de Amatlan de Cañas.

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN DE LA ZONA DEL CEBORUCO

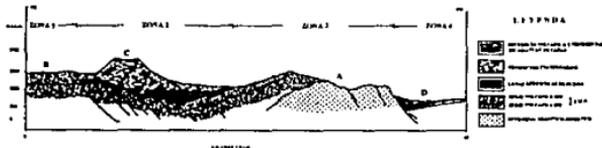


Figura VII.20 Realce espacial en dirección NE-SW obtenido a partir de la suma de los filtrados en dirección NE y SW de la primera componente (CP1) de las bandas reflectivas de la imagen Ceboruco y zonas estructurales obtenidas del análisis de lineamientos y su correlación con el modelo propuesto por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

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Este estudio del uso de imágenes Landsat Thematic Mapper (TM) para el mapeo de alteración hidrotermal y lineamientos dentro del área del Volcán Ceboruco en Nayarit, México muestra el gran potencial de los datos de percepción remota y técnicas de procesamiento digital para el mapeo de alteración y de estructuras en áreas con una densa cobertura de vegetación en México. Los resultados también muestran la importancia de la información espectral en la región de longitud de onda del infrarrojo medio para el mapeo de grupos de minerales importantes en la exploración minera tales como los óxidos e hidroxilos. Se tiene así un medio rápido y efectivo para la identificación y delimitación de zonas mineralizadas con el consecuente ahorro de tiempo y de recursos económicos y humanos.

Los mejores resultados que permiten el despliegue óptimo de la información realzada espectralmente para el mapeo de alteración se obtuvieron de la composición de color formada por las imágenes de óxidos (O), hidroxilos (H) y óxidos+hidroxilos (O+H) obtenidas por la Técnica de Crosta para cuatro y seis bandas (figuras VII.12 y 16). Diferencias distintivas de color en estas composiciones permiten discriminar zonas de alteración con mayor potencial minero en color blanco, zonas tanto con óxidos e hidroxilos pero con predominancia de estos últimos en tonos rojizos a naranja y zonas con mayor oxidación en tonos cian a azulados. Sin embargo, también son mapeadas zonas que presentan alteración como es el caso de las lavas del Volcán Ceboruco las cuales dan una respuesta igual a la alteración. Lo anterior es debido a que dichas lavas están cubiertas por líquen que hace que aumente su reflectancia por lo que estas no reflejan las verdaderas características espectrales de los minerales que contienen.

El uso de la Técnica de Crosta con seis y cuatro bandas no presenta ventajas en el realce de información para el mapeo de alteración en relación a la calidad de la misma, pero sí presenta diferencias en lo que se refiere al análisis para la selección de las componentes que contengan los materiales buscados, debido a que en la técnica de Crosta con cuatro bandas se seleccionan regiones espectrales específicas donde los materiales presentes en escena tienen una respuesta característica; lo que hace que sea más sencilla la selección de las componentes principales representativas de dichos materiales y que se ahorre tiempo de cómputo al procesar menos imágenes.

La Técnica de Análisis de Componentes Principales Dirigidas (ACPD) fue utilizada con el objetivo de obtener un análisis cuantitativo a escala de la imagen de la presencia tanto de óxidos de hierro como de vegetación, los cuales son muy abundantes en el área de estudio e interfieren en la identificación de zonas alteradas; aunque si bien los óxidos son importantes en el mapeo de alteración estos se presentan en su mayor parte dentro del área como productos de alteración supergénica. Los resultados obtenidos a nivel

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

de la escala de la imagen con esta técnica indican la gran abundancia de vegetación en toda el área que interfiere (tonos amarillos) en la respuesta de los óxidos (goethita) (figura VII.8) lo que ocasiona que el uso de la técnica de cocientes de bandas no sea adecuada para el mapeo de alteración dentro del área. Los resultados obtenidos para la distribución de hematita y goethita por medio de esta técnica indican que ésta es controlada por los procesos del paisaje y no por los afloramientos geológicos. La goethita tiende a ser concentrada en las pendientes y en áreas de bajo relieve (tonos rojizos en la figura VII.8) mientras que la hematita está asociada con terrenos elevados y suelos más antiguos (tonos azulados en la figura VII.8). Esto implica que las áreas con procesos físicos activos presentan goethita mientras que las superficies maduras hematita.

El realce espacial para el mapeo de lineamientos se obtuvo por medio de la suma de los filtrados en dirección NW, NE, SE y SW usando los filtros de Prewitt y el Laplaciano usando la ventana 2 (figuras VII. 18, 19 y 20) sobre la componente principal 1 de las seis bandas no térmicas de la imagen Ceboruco. Del análisis de los lineamientos de las figuras VII.18, 19 y 20 se tienen dos patrones de fallamiento, uno en dirección NW-SE y otro en dirección NE-SW que se interceptan de forma perpendicular formando un patrón en forma de enrejado en el área. Este patrón de enrejado dentro del área forma cuatro grandes zonas estructurales la zona 1 formada por la Sierra Madre Occidental, la zona 2 compuestas por una estructura de tipo graben que ocupa la parte central del área limitada al NE por la zona 1 (Sierra Madre Occidental) y al SW por la Sierra El Guamuchil (zona 3), la zona 3 compuesta por una estructura de tipo horst representada por la Sierra El Guamuchil limitada en su extremo sur por la falla del Río Ameca y al norte por los materiales volcánicos del Eje Neovolcánico (Depresión de Amatlán de Cañas) y la zona cuatro formada por la Depresión de Amatlán de Cañas. Los filtrados Laplaciano de las figuras VII. 17 y 18 muestran un patrón dendrítico para la Sierra Madre Occidental y la Sierra el Guamuchil, así como diferentes estructuras circulares y curvilíneas relacionadas a domos volcánicos y conos cineríticos.

De acuerdo con el mapeo de alteración hidrotermal obtenido por medio de la Técnica de Crosta con seis y cuatro bandas, la distribución de los óxidos de hierro obtenida por medio de la Técnica de Análisis Componentes Principales Dirigido y el mapeo de lineamientos en el área y los trabajos de campo las zonas más favorables de mineralización son: La Sierra Madre Occidental dentro del área de Jala-Jomulco y Rosa Blanca en la parte NE del área de estudio y la Sierra El Guamuchil muchil en su parte superior y en las zonas asociadas a la falla del Río Ameca (El Pilón y Molinete).

De lo antes expuesto se desprende que:

1. Los datos de percepción remota (en este caso los del Sistema Landsat-TM) son una herramienta disponible hoy en día para la exploración minera de grandes áreas de forma rápida y eficiente.
2. Estos pueden ser utilizados para solucionar en gran parte el déficit de exploración que actualmente afecta a la industria minera del país.
3. El procesamiento de los datos de percepción remota empleando la Técnica de Crosta y la composición en color de las imágenes resultantes de la misma mapean de

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

manera eficiente las zonas de alteración al aislar de manera eficiente la respuesta de vegetación.

4. No existen grandes diferencias en relación a extracción de información espectral para el mapeo de zonas alteradas usando la Técnica de Crosta con seis y cuatro bandas, pero sí en los tiempos de computo y análisis de los resultados.

5. El ACPD es una técnica útil para dar una estimación de la cantidad de hematita, goethita y vegetación a escala de la imagen.

6. Del análisis espectral se tiene que la alteración se manifiesta en las rocas ácidas de la secuencia volcánica de la Sierra El Guamuchil y la Sierra Madre Occidental.

7. El análisis de la información obtenida del realce espacial de la Imagen Ceboruco revela que el área está afectada por dos sistemas de fallamiento. El primero con dirección NW-SE y el segundo con dirección NE-SW; formando un patrón en forma de enrejado.

8. Del punto anterior se desprende que está conformada por cuatro zonas estructurales formando estructuras en bloques.

9. De la conjunción de la información espectral y espacial de los puntos 6, 7 y 8 y de trabajo de campo se infiere que la alteración está controlada en forma general por estructuras con orientación NW-SE en intersección con estructuras con orientación NE-SW.

10. De acuerdo a lo expuesto en los puntos 6 y 9 las zonas más favorables para la mineralización se localizan en rocas terciarias pertenecientes a la Sierra Madre Occidental y a la Sierra El Guamuchil, controlada en forma general por un sistema de fallamiento con dirección NW-SE y NE-SW.

## RECOMENDACIONES

1. Hacer estudios de geoquímica sobre las áreas favorables para determinar de forma precisa el tipo de alteración, así como estudios petrográficos y petroquímicos para la clasificación de las rocas encajonantes de la mineralización.

2. Obtener imágenes con sensores con una mayor resolución espectral y espacial (p.e. AVIRIS) de las áreas favorables para la identificación de minerales individuales característicos de ciertos tipos de alteración (p.e. caolinita, alunita calcita).

3. Hacer estudios aeromagnéticos de las áreas favorables para su estudio estructural a detalle.

4.- Elaborar con la información obtenida de las imágenes de satélite Landsat-TM, la obtenida en los puntos 1, 2, 3, y 4 y con la información adicional que esté disponible, un Sistema de Información Geográfica (SIG) que sirva de base para el estudio de la génesis de la mineralización.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abrams, M. J.**, 1984, Landsat-4 Thematic Mapper and Thematic Mapper Simulator Data for a Porphyry Copper Deposit: Photogrammetric Engineering and remote sensing, Vol. 50. no. 8, pp. 1171-1173.
- Amos, B. J. y Greenbaum, D.**, 1989, Alteration Detection Using TM Imagery The Effects of Supergene Weathering in an Arid Climate: Int. J. Remote Sensing, Vol. 10, No. 3, pp. 515-527.
- Anuta, P. E.**, 1977, Computer-Assisted Analysis Techniques for Remote Sensing Data Interpretation: Geophysics, Vol. 42, No. 3, pp. 468-481.
- Atwater, T.**, 1970, Implication of Plate Tectonic for the Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America: Geol. Soc. America Bull., Vol 81, pp. 3513-3536.
- Bham, S. K.**, 1983, Utility of Landsat Data in Mineral Exploration- A Case Study from Orissa, India: Adv. Space Des., Vol. 3, No. 2, pp. 95-98.
- Bennett, S.**, 1993, Introduction to Remote Sensing and its Applications for Precious Metal Exploration: Seminario, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Agosto 1993, México, D.F..
- Buckingham, W. F. y Sommer, S. E.**, 1983, Mineralogical Characterization of Rock Surfaces Formed by Hydrothermal Alteration and Weathering - Application to Remote Sensing: Economic Geology, Vol. 78, pp. 664-674.
- Canas, A. D. y Barnett, M. E.**, 1985, The Generation and Interpretation of False-Colour Composite Principal Component Images: Int. J. remote Sensing, Vol. 6, No. 6, pp. 867-881.
- Carter, W. D.**, 1983, Economic Geology: American Society of Photogrammetry, Manual of Remote Sensing, Second Edition, Volumen II, Chapter II, pp. 1788-1820.
- Clark, K. F., Foster, C. T. y Damon, P.E.**, 1982, Cenozoic Mineral Deposits and Subduction-Related Magmatic Arcs in Mexico: Geological Society of America Bulletin, Vol. 93, pp. 533-544.
- 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, Mexico, Nevada Bur. Mines Rept. 33, pp. 189-202.
- Cooley, W. W. y Lohnes, P. B.**, 1972, Multivariate Data Analysis: John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 49-97.

## BIBLIOGRAFÍA

- Colwell, R. N., 1984, From Photographic Interpretation to Remote Sensing: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, pp. 1305-1307.
- Coney, P. J. y Reynolds, S. J., 1977, Cordilleran Benoiff Zones: Nature, Vol. 270, pp. 403-406.
- 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: Proceeding of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Alberta, Canada, Oct. 2-6, pp. 1173-1187.
- Chavez, P.S. Jr. y Yaw Kwarieng, 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.
- Damon, P. E., Shafiqullah, M. y Clark, K. F., 1983, Geochronology of the Porphyry Cooper Deposits and Related Mineralization of Mexico: Can. J. Earth SCI, Vol. 20, pp. 1052-1071.
- 1981, Evolución de los Arcos Magmáticos en México y su Relación con la Metalogénesis: Rev. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Vol. 5, No. 2, pp. 223-238.
- Damon, P. E., 1978, Mineralization in Time and Space in Northwestern Mexico and South-Western United State: 1° Simp. Geol. Pot. Min. Edo. Sonora (Res), pp. 41-44.
- Davis, P. A. y Berlin, G. L., 1989, Rock Discrimination in the Complex Geologic Environment of Jabal Salma, Saudi Arabia, Using Landsat Thematic Mapper Data: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No. 8, pp. 1147-1160.
- 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.
- Dickinson, W. R., 1975, Potash-Depth (K-h) relations in continental-margin and intraoceanic magmatic arcs: Geology, Vol. 3, pp. 53-56.
- Dickinson, W. R. y Snyder, W. S. , 1979, Geometry of Subducted Slabs related to San Andres Transform: Journal of Geology, Vol. 87, pp. 609-627.
- Drury, S. A. y Hunt, G. A., 1989, Geological Uses of Remotely-Sensed Reflected and Emitted Data of Lateritized Archaean Terrain in Western Australia: Int. J. Remote Sensing, Vol. 10, No. 3, pp. 475-497.
- Estes, J. E. y Tinney, L. R., 1983, Fundamentals of Image Analysis: Analysis of Visible and Thermal Infrared Data: American Society of Photogrammetry, Manual of Remote Sensing, Second Edition, Volumen I, Chapter 24, pp. 987-1124.

## BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Ferri, L., Pasquaré, G., Venegas, S., Castillo, D. y Romero, F., 1993. Estudio Geológico Estructural del Área Ceberuco-San Pedro y Tectónica Regional del Sector Notoccidental del Rift de Tepic: *Geotermia, Rev. Mexicana de Geoenergía*, Vol. 9, No. 1, pp. 93-116.
- Fernandez-Alonso, M. y Tahon, A., 1991, Lithological Discrimination and Structural Trends in W-Rwanda (Africa) on Images of Airborne Radiometric and Aeromagnetic Surveys, Coregistered to a Landsat TM Scene: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 57, No. 7, pp.1155-1162.
- Gastil, R. G., Krummenacher, D. y Jensky, W. A., 1978, Reconnaissance Geology of West-Central Nayarit, Mexico, Mexico: Geological Society of America Map and Chart Series Ms-24, 8 p., scale 1:200 000.
- Gillespie, A. R., Kahle, A. B. y Walker, R. E., 1986, Color Enhancement of Highly Correlated Images. I. Decorrelation and HSI Contrast Stretches: *Remote Sensing of Environment*, 20, pp. 209-235.
- Green, W. B., 1983, Quantitative Image Processing Techniques: *Digital Image Processing*, New York, Van Nostrand Reinhold Company, Inc., pp. 77-105
- Goetz, A. F. y Rock, B. N., 1983, Remote Sensing for Exploration: An Overview: *Economic Geology*, Vol. 78, No. 4, pp. 573-590.
- González-Partida y Torres-Rodríguez, V., 1988, Evolución Tectónica de la Porción Centro-Occidental de México y su Relación con los Yacimientos Minerales Asociados: *Geofísica Internacional*, Vol. 27, No. 4, pp. 543-581.
- Gonzalez, R. C. y Wintz, P., 1983, *Digital Image Processing*, Sixth Printing: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 431 pp.
- Guilbert, J. M. y Park, Ch. F., 1986, *The Geology of Ore Deposit*: W. H. Freeman and Company, N. Y.
- Gunn, B. M. y Mooser, F., 1970, Geochemistry of the Volcanics of Central Mexico: *Bulletin Volcanologique*, Vol. 34, pp. 557-616.
- Gutiérrez, E. y García, E., 1993, Medidas para Reactivar la Pequeña y Mediana Empresa de la Minería: *El Financiero, Análisis Económico, Reporte Semanal*, 5 de abril, p. 6A.
- Gwynn, H. S., 1983, The Nature of Electromagnetic Radiation: *American Society of Photogrammetry, Manual of Remote Sensing*, Second Edition, Volumen I, Chapter 2, pp. 37-60.
- Haralick, R. M., 1973, Glossary and Index to Remotely Sensed Image Pattern Recognition Concepts: *Pattern Recognition*, Vol. 5, pp. 391-403.
- Hedenquist, J. W. y Henley, R. W., 1985, *Epithermal Precious Metal Environments: Workshop Course Proceeding*, Taupo, New Zealand

## BIBLIOGRAFÍA

- Hutchinson, R. D.**, 1980, A Mineral Exploration Strategy for the 1980's: CIM Bulletin (August), pp. 26-29
- Hunt, G. R. y Ashy, 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  $\mu\text{m}$ ) 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.
- Keith, S. B.**, 1978, Paleosubduction Geometries Inferred from Cretaceous and Tertiary Magmatic Patterns in Southwestern North America: Geology, Vol. 6, pp. 516-521.
- Jensen, J. R.**, 1986, Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective: Prentice-Hall, 379 pp.
- 1983, Biophysical Remote Sensing: Annals of the Association of American Geographer, Vol. 73, pp. 111-132.
- Jensen, J. R. y Chery, D. L.**, 1980, Landsat Crop Identification for Watershed Water Balance Determination: Int. J. Of Remote Sensing, Vol. 1, pp. 345-359.
- Ley Minera**, 1992, Diario Oficial de la Federación, Junio 26, pp.21-44.
- Lillesand, T. M. y Keifer, R. W.**, 1987, Remote Sensing and Image Interpretation: Second Edition, Jhon Wiley & Sons, 721 pp.
- Luhr, J.F., Nelson, S. A., Allan, J. F. y Carmichael, I. S.**, 1985, Active Rifting in Southwestern Mexico: Manifestation of an Incipient Eastward Spreading-Ridge Jump, Geology, Vol.13, pp.54-57.
- Lopez Ramos, E.**, 1985, Geología de México, Tomo II, Tercera Edición, Ed. Escolar.
- Loughlin, W. P.**, 1991, Principal Component Analysis for Alteration Mapping: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 57, No. 9, pp. 1163-1169.
- Marfunin, A. S.**, 1979, Physics of Minerals and Inorganic Materials: Springer-Verlag, New York.
- Markham, B. L. y Barker, J. L.**, 1985, Spectral Characterization of the Landsat Thematic Mapper Sensors: Int. J. Remote Sensing, Vol. 6, No. 5, pp. 697-716.
- Masuoka, P. M., Harris, I., Lowman Jr., P. D. y Blodget, H.W.**, 1988, Digital Processing of Orbital Radar Data to Enhance Geologic Structure: Exemples from the Canadian Shield, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 54, No. 5, pp. 621-632.
- McDowell, F. W. y Clabaugh, S. E.**, 1979, Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their Relation to the Tectonic History of Western Mexico: Geol. Soc. America Spec. Paper 180, pp. 113-124.

## BIBLIOGRAFÍA

- McDowell, F. W. y Keizer, R. P.**, 1977, Timing of Mid-Tertiary Volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico: *Geol. Soc. America Bull.*, Vol. 58, pp.1479-1487.
- Mitchell, A. H. G. y Garson, M. S.**, 1981, *Mineral Deposit and tectonic Setting*: Academic Press.
- 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.
- Mooser, F. y Maldonado, K. M.**1967, Mexican National Report on Volcanology: *Ann. Inst. Geofísica*, 12, pp. 99-106.
- Nelson, S. A.**, 1986, Geología del Volcán Ceboruco, Nayarit, con una Estimación de Riesgo de Erupciones Futuras: *Rev. Inst. de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, Vol. 6, No. 2, pp. 243-258.
- Nixon, G. T., Demant, A., Armstrong, R. L. y Harakal, J. E.**, 1987, K-Ar and Geologic Data Bearing on the Age and Evolution of the Transmexican Volcanic Belt: *Geof. Int.*, Vol. 26, No. 1.
- Offield, T. W., Abbott, E. A., Gillespie, A. R. y Loguercio, A. O.**, 1977, Structure Mapping on Enhanced Landsat Image of Southern Brazil: Tectonic Control of Mineralization and Speculations on Metallogeny: *Geophysics*, Vol. 42, No. 3, pp. 482-500.
- Park, C. F. y MacDiarmid, R. A.**, 1981, *Ore Deposit*: W. H. Freeman and Company, S. F.
- Perez Muñoz, M.**, 1986, Inventario de los Recursos Minerales en los Municipios del Estado de Jalisco: Instituto de Geografía y Estadística, Universidad de Guadalajara.
- Petersen, U.**, 1990, Ore Distribution, Zoning, and Exploration of Hydrothermal Ore Deposits: *Economic Geology*, Vol. 85, pp. 424-435.
- Pla, L. E.**, 1986, Análisis Multivariado: Métodos de Componentes Principales: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Serie Matemática, Monografía No. 27, 94 p.
- Podwysoki, M. H., Segal, D. B. y Abrams M. J.**, 1983, Use of Multispectral Scanner Images for Assessment of Hydrothermal Alteration in the Marysvale, Utah, Mining Area: *Economic Geology*, Vol. 78, No. 4, pp. 675-687.
- Pratt, W. K.**, 1978, *Digital Image Processing*: John Wiley & Sons, Inc., pp. 478-490.
- Reglamento de la Ley Minera**, 1992, Diario Oficial de la Federación, Marzo 29, pp. 46-70.
- Richards, J. A.**, 1986, *Remote Sensing Digital Image Analysis*: Springer-Verlag, 281 pp.
- Robinson, G. S.**, 1977, Edge Detection by Compass Gradient Masks: *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 6, pp. 492-501.
- 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.
- Rosenfeld, A. y Kak, A. C.**, 1976, *Digital Picture Processing*: Academic Press, 457 pp.

## BIBLIOGRAFÍA

- Rowan, L. C., Goetz, A. F. y Ashley, R. P.**, Discrimination of Hydrothermally Altered and Unaltered Rock in Visible and Near Infrared Multispectral Images: *Geophysics*, Vol. 42, No. 3, pp. 522-535.
- 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 Licheson the Reflectance Spectra of Granitic Rock Surface: *Remote Sensing of Environment*, Vol 18, 105-112.
- Scheubel, F. R., Clark, K. F. y Porter, E. W.**, 1988, *Geology, Tectonic Environment, and Structural Controls in the San Martin de Bolaños District, Jalisco, Mexico*: *Economic Geology*, Vol. 83, pp. 1703-1720.
- Segal, D. B. y Merin, S.**, 1989, Successful Use of Landsat Thematic Mapper Data for Mapping Hydrocarbon Microseepage-Induced Mineralogic Alteration, Lisbon Valley, Utha: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 8, pp. 1137-1145.
- Singh, A. y Harrison, A.**, 1985, Standardized Principal Components: *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 6, No. 6, pp. 883-896.
- Swain, P. H. y Davis, S. M.**, 1978, *Remote Sensing: The Quantitative Approach*: Mc. Graw-Hill Book Company, New York.
- Taranik, J. V.**, 1978, *Principles of Computer Processing of Landsat Data for Geologic Applications*: U. S. Geological Survey Open File, Report 78-187, Washington, D. C., U. S. Department of Interior.
- The Mining-Metallurgy Industry in Mexico**, 1992, *Estrategia Industrial*, No. 108, Año IX, pp. 28-29.
- Walsh S. J., Cooper J. W, Von Essen I.E. y Gallager K. R.**, 1990, Image Enhancement of Landast Thematic Mapper Data and GIS Data Integration for Evaluation of Resource Characteristics: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 56, No.8, pp. 1135-1141.
- Wester, K.**, 1992, *Spectral Signature Measurements and Image Processing for Geological Remote Sensing*: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Physical Geography, Stockholm University, 130 p.
- White, N. C. y Hedenquist J. W.**, 1990, Epithermal Environments and Styles of Mineralization: Variations and their Causes, and Guidelines for Exploration, *Journal of Geochemical Exploration*, 36, pp. 445-474.
- Williams, Jr. J. S.**, 1983, *Geologic Mapping*: American Society of Photogrammetry, Manual of Remote Sensing, Second Edition, Volumen II, Chapter 31, pp. 1763-1788.
- Williams, Jr. R. S., Chavez, Jr. P. S., Podwysocky, M. H. y Segal, D. B.**, 1983, *Digital Image Processing and Enhancement for Geology*: American Society of Photogrammetry, Manual of Remote Sensing, Second Edition, Volumen II, Chapter 31, pp. 1738-1744.
- Wisser, E.**, 1966, The Epithermal Precious Metal Province of Northwest Mexico: *Nevada Bur. Mines Rept.*, 13, pt. C. pp. 63-92.

## APÉNDICE A

### Diagonalización de una matriz

Considera la matriz de transformación  $M$  tal que:

$$Y = MX \quad (\text{A.1})$$

Los valores característicos  $\lambda_i$  de  $M$  y sus vectores característicos  $x_i$  son definidos por la expresión:

$$\lambda_i x_i = Mx_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (\text{A.2})$$

donde  $n$  es el número de valores característicos distintos.

Entonces se pueden escribir  $n$  diferentes ecuaciones que pueden ser expresadas de manera compacta como:

$$X\Lambda = MX \quad (\text{A.3})$$

donde  $\Lambda$  es la matriz diagonal

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

y  $X$  es la matriz de vectores característicos  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Consecuentemente:

$$\Lambda = X^{-1}MX \quad (\text{A.5})$$

donde:

$\Lambda$ = Forma Diagonal de la matriz  $M$

$X$ = Matriz diagonalizadora de  $M$