



14  
Zejun.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

FACULTAD DE INGENIERIA

MAPEO GEOLOGICO Y DE ALTERACION  
HIDROTERMAL, UTILIZANDO IMAGENES DE  
SATELITE EN EL CAMPO GEOTERMICO DE LA  
PRIMAVERA, JALISCO, MEXICO

FALLA DE ORIGEN

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOLOGO  
P R E S E N T A  
**GERMAN OROZCO MEDINA**



MEXICO, D.F.

1995



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-059

**SR. GERMAN OROZCO MEDINA**  
Presente

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

**MAPEO GEOLOGICO Y DE ALTERACION HIDROTHERMAL UTILIZANDO IMAGENES  
DE SATELITE EN EL CAMPO GEOTERMICO DE LA PRIMAVERA, JALISCO, MEXICO**

	<b>INTRODUCCION</b>
<b>I</b>	<b>ASPECTOS GENERALES DE LA GEOTERMIA</b>
<b>II</b>	<b>AREA DE ESTUDIO</b>
<b>III</b>	<b>MARCO GEOLOGICO</b>
<b>IV</b>	<b>CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCION REMOTA</b>
<b>V</b>	<b>PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN</b>
	<b>CONCLUSIONES</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.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 4 de octubre de 1995  
EL DIRECTOR

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\*RLR\*gtg

***Dedicada a:***

***Mis padres: Fernando y Elba  
por su apoyo incondicional durante toda mi vida***

***A mis hermanos: Marcos  
Gabriel  
Raúl  
Héctor  
por ser hermanos y amigos.***

***A toda la familia Orozco  
A toda la familia Medina  
Por sus raíces***

*A mis amigos: Romo*

*Fred*

*Erik*

*Aguiv*

*Mau*

*Jorge*

*Marco*

*Raül*

*Toño*

*Juan*

*Raül*

*Mike*

*Jorge*

*Martin*

*quienes siempre han estado en el momento preciso*

*A Eusebio Hernández<sup>+</sup>*

*quien me enseñó a a mirar siempre hacia arriba*

*A la Facultad de Ingeniería y la Asociación de Montañismo de la UNAM  
de donde estaré siempre agradecido*

*De la manera más sincera agradezco a la Dra. Rosa María Prol Ledesma quien a pesar de sus múltiples ocupaciones, siempre me brindó apoyo total para la realización del presente trabajo.*

*Al los Drs. Gerardo Carrasco y Hugo Delgado por haberme dado la oportunidad de entrar al mundo de la investigación. Al M. en C. Héctor Ochoa quien afianzó mis gustos por la Geología.*

*Mi agradecimiento a todo el personal académico de la Facultad de Ingeniería, en especial al Ing. Alfredo Victoria, al Ing. Héctor Macías, al Ing. Germán Arriaga, al Ing. Emiliano Campos y al Dr. Eduardo González, más que por los comentarios acerca de la tesis, por sus consejos extra-académicos.*

## **INDICE GENERAL**

<b>INTRODUCCION.</b>	<b>1</b>
<b>I. ASPECTOS GENERALES DE LA GEOTERMIA</b>	<b>4</b>
I.1 Definiciones y Conceptos	4
I.2 Situación de la geotermia en México	8
I.3 Campo geotérmico La Primavera	10
<b>II. AREA DE ESTUDIO</b>	<b>12</b>
II:1 Antecedentes	12
II.1 Localización Geográfica y Fisiográfica	12
II.2 Geomorfología e Hidrografía	14
<b>III. MARCO GEOLOGICO</b>	<b>15</b>
III.1 Generalidades	15
III.2 Tectónica Regional	15
III.3 Evolución Geológica de la Sierra La Primavera	18
III.4 Geología Estructural	24
III.5 Sistema Geotérmico	26
<b>IV. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCION REMOTA</b>	<b>28</b>
IV.1 Introducción	28
IV.2 Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera	29
IV.3 Interacción de la radiación electromagnética con suelo, roca y vegetación	29
IV.4 Características de las imágenes y los sensores remotos Lansat MSS y TM	33

<b>V. PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN</b>	38
V.1 Introducción	38
V.2 Método de procesamiento	38
V.3 Análisis estadístico	39
V.4 Preprocesamiento	41
V.5 Realce Digital	43
V.5.1 Técnicas de realce espectral	43
V.5.2 Realce espectral para el mapeo de alteración hidrotermal	46
V.5.3 Técnicas de realce espacial	56
V.3.2 Realce espacial para el mapeo de lineamientos	58
<b>CONCLUSIONES</b>	65
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	67



## **INDICE GENERAL DE FIGURAS**

<b>No:</b>	<b>Descripción:</b>
I.1	Mapa de localización de zonas geotérmicas en México
II.1	Mapa de localización geográfica y fisiográfica de la Sierra La Primavera
III.1	Mapa Geológico de la Sierra La Primavera
III.2	Mapa Tectónico Regional de la Sierra La Primavera
III.3	Evolución geológica de la Sierra La Primavera
IV.1	Espectro electromagnético
IV.2	Curva de reflectancia espectral de la Vegetación
IV.3	Curva de reflectancia espectral de los hidroxilos
V.1	Composición en colores naturales de la imagen La Primavera.
V.2	Reflectancia espectral de la vegetación y de los hidroxilos.
V.3	Cociente de bandas TM5/TM7 de la imagen La Primavera
V.4	Cociente de bandas TM4/TM3 de la imagen La Primavera
V.5	Composición a color de los cocientes TM5/TM7, TM4/TM3 y TM3/TM1
V.6	Componente Principal 3 de la imagen La Primavera
V.7	Componente Principal 4 de la imagen La Primavera
V.8	Filtro pasa-bajas para suavizado de la imagen.
V.9	Filtro de realce de bordes no direccional.
V.10	Cuadrante NE de la imagen La Primavera con filtro direccional NE-SW
V.11	Filtro direccional NW-SE.

## **INDICE GENERAL DE TABLAS**

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>
I.1	Parámetros técnicos del Campo Geotérmico La Primavera.
III.1	Edades y eventos de la Sierra La Primavera.
IV.1	Resoluciones de los sistemas MSS y TM en los Landsat 4 y 5.
IV.2	Características de las bandas espectrales del Landsat TM
V.1	Estadísticas univariadas de las siete bandas de la imagen La Primavera
V.2	Estadísticas multivariadas de las seis bandas no térmicas de la imagen La Primavera
V.3	Corrección de datos radiométricos de las seis bandas no térmicas de la imagen La Primavera.
V.4	Características espectrales de la vegetación y de los hidroxilos.
V.5	Transformación de Componentes Principales de las 6 bandas no térmicas de la imagen La Primavera
V.6	Filtros direccionales de Prewitt y no direccionales.

## **INTRODUCCION.**

" La energía térmica contenida en el interior del planeta es un recurso, quizá sólo superada por la proveniente del sol en magnitud y disponibilidad. De propósitos y usos múltiples, la geoenergía es capaz de generar electricidad, de enfriar o calentar el espacio, de producir materias primas industriales y de empleo creciente en la agricultura, floricultura, acuacultura, así como en procesos de manufactura.

**El potencial energético total que contiene la geotermia aún no ha sido cuantificado y está lejos de ser cabalmente explotado. La geotermia puede desempeñar un papel decisivo como fuente alterna para las necesidades energéticas de la humanidad en un futuro próximo."**

La siempre creciente necesidad de energéticos y la conciencia muy marcada que se ha desarrollado en los últimos años sobre las reservas de energía fósil y el impacto ambiental que ha causado su uso indiscriminado, han impulsado la búsqueda de fuentes alternas de energía contribuyendo al desarrollo de la exploración geotérmica.

De las fuentes no convencionales de energía, la geotermia es la única que ha demostrado factibilidad técnica y económica para la producción continua de volúmenes relativamente altos de energía eléctrica (hasta de 1500 MW) por campo, ser parcialmente renovable, reduciendo la emisión de gases con efecto tipo invernadero y por presentar costos competitivos con respecto a los de las fuentes convencionales de energía (Torres-Rodríguez et al, 1993).

Con el desarrollo de la tecnología espacial, el avance de la computación y la conjunción de varias ramas de las geociencias surge la percepción remota como una nueva herramienta en la exploración de los recursos naturales.

Mediante la Percepción Remota se obtiene información acerca de recursos naturales sin entrar en contacto físico con el área de estudio. El principio físico consiste en

captar los cambios en la cantidad y propiedades de la radiación electromagnética que interactúa con los objetos que componen la superficie terrestre. Dichos cambios son detectados por sensores montados en aviones y/o satélites.

Los satélites Landsat fueron creados especialmente para el estudio de los recursos naturales como pueden ser identificación de vegetación, uso de suelos, monitoreo de medio ambiente y estudios oceanográficos entre otros. Algunas de las cualidades de las imágenes Landsat son:

- Proporcionar de una vista sinóptica de grandes áreas de terreno (cada imagen Landsat cubre un área de aproximadamente  $185 \times 185 \text{ km} = 34225 \text{ km}^2$ ), bajo condiciones de iluminación prácticamente uniformes.
- Obtener mediciones repetitivas haciendo posible el monitoreo de cambios en el terreno.
- Ser multispectrales, es decir, contener diferentes tipos de información sobre la misma escena en cada una de las bandas espectrales que componen la imagen.
- Tener un formato digital lo que permite manipularlas matemáticamente.

A partir del procesamiento de imágenes Landsat es posible elaborar mapas litológicos y mapas estructurales con base en lineamientos. Esta información obtenida permite establecer zonas con mayor posibilidad de encontrar yacimientos, para este caso, de tipo geotérmico.

Dentro de un campo geotérmico es posible efectuar la caracterización de áreas con un potencial importante para la explotación de energía eléctrica utilizando imágenes de satélite, modelos digitales de elevación del terreno, así como mapas geológicos y tectónicos (Prol-Ledesma et al., 1992).

Las imágenes de satélite se usan principalmente para las etapas de reconocimiento en la exploración geotérmica debido a la capacidad de cubrir áreas grandes con una sola imagen para determinar características superficiales como contactos geológicos, anomalías topográficas y zonas de alteración hidrotermal. Durante las etapas avanzadas de exploración y en las de explotación, las técnicas de procesamiento de imágenes se pueden usar en

correlación con otros datos geológicos, geofísicos y geoquímicos en los estudios de factibilidad de campo. El procesamiento de imágenes es especialmente importante en los estudios estructurales de los campos, para determinar fallas y fracturas relacionadas con la permeabilidad secundaria de las rocas del yacimiento. En las etapas iniciales, la evaluación preliminar de un campo requiere conocer la descarga natural del sistema basada en el mapeo de las manifestaciones superficiales (Prol-Ledesma et al., 1992). Las firmas espectrales de los minerales de alteración (Hunt, 1979) proporcionan información adicional para detectar y cuantificar el área cubierta por alteración hidrotermal, además de clasificar el tipo a que corresponde y su intensidad.

Las técnicas de procesamiento de imágenes han sido desarrolladas principalmente en la exploración minera teniendo excelentes resultados. El objetivo general de este trabajo es demostrar que dichas técnicas pueden ser aplicadas en la exploración geotérmica, tomando como ejemplo el campo geotérmico de La Primavera. Los objetivos particulares se describen a continuación:

- 1) Mapeo de zonas de alteración hidrotermal mediante técnicas de realce espectral.
- 2) Mapeo de lineamientos mediante técnicas de realce espacial.
- 3) Correlación de la información obtenida con estudios antecedentes para delimitar áreas con mayor potencial geotérmico.

Esta tesis consta de cinco capítulos. En el capítulo I se presentan aspectos generales, el estado actual de la geotermia en México así como la situación del campo geotérmico La Primavera. En el capítulo II se delimita el área de estudio geográfica y fisiográficamente. En el capítulo III se describe la geología del campo a escala regional. El capítulo IV trata los conceptos y fundamentos de la percepción remota para poder comprender mejor el procesamiento de la imagen de satélite, siendo en el capítulo V donde propiamente se manipula la imagen, y se hace una correlación de la información geológica disponible. Finalmente se presentan las conclusiones a las que se llegó y se dan algunas recomendaciones.

# I. ASPECTOS GENERALES DE LA GEOTERMIA

## I.1 Definiciones y conceptos

Desde el punto de vista termodinámico, el uso de la energía geotérmica está basado en la diferencia de temperatura entre la masa rocosa y agua del subsuelo y la masa de agua o aire en la superficie de la Tierra. Esta diferencia de temperatura es la que permite la producción de energía geotérmica que puede ser usada directamente o convertida en energía mecánica o eléctrica (Buntebarth, 1994).

### *Definición de Geotermia*

La palabra geotermia se refiere, en términos generales, al calor natural existente en el interior de la tierra; sin embargo, desde el punto de vista práctico, se le denomina así al estudio y utilización de la energía calorífica que es transportada a través de la roca o por fluidos y se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia niveles superficiales de la misma, para formar yacimientos geotérmicos. Al conjunto integrado por la fuente de calor, el fluido y la zona cortical permeable donde éste se almacena o circula, se le denomina sistema geotérmico (Razo, 1992). La energía almacenada en forma de calor en las rocas y en acuíferos cerca de la superficie, es susceptible en ciertos casos de ser aprovechada mediante la perforación de pozos de poca o gran profundidad (hasta de 5 km). Cuando esto sucede en condiciones favorables, el yacimiento y las instalaciones superficiales constituyen lo que se denomina campo geotérmico.

### *Fuentes generadoras de calor*

Hasta el momento se conocen diversas fuentes generadoras de calor en el interior de la tierra debidas al decaimiento de minerales radioactivos, reacciones químicas, fricción, presión mecánica, etc. Existen distintos mecanismos para la transferencia de calor, estos son la conducción (contacto físico entre materiales de diferente temperatura), radiación (a través de ondas electromagnéticas) y por convección (movimiento de masas debido a diferencias de densidad y temperatura). Este último es el mecanismo principal al cual se asocian genéticamente los yacimientos geotérmicos.

De acuerdo con la teoría de tectónica de placas, las corrientes de convección en la astenosfera han originado placas oceánicas y continentales en la corteza terrestre, que al colisionar o separarse constituyen regiones geológicamente activas en las cuales se presentan los fenómenos de subducción de placas o la formación de fisuras corticales. En el primer caso, la colisión e introducción de una placa por debajo de la otra genera elevadas temperaturas y la fusión de roca, formando magma que en ocasiones fluye hasta la superficie para crear volcanes. En el segundo caso, al separarse la corteza por el movimiento de las placas, el magma asciende desde el manto a través de la litósfera y se derrama en la superficie originando también vulcanismo.

La energía calorífica transportada hacia los niveles superiores de la corteza, en cualesquiera de las formas indicadas en el párrafo anterior, puede ser almacenada en la roca o en acuíferos localizados a grandes profundidades, llegando a constituir yacimientos geotérmicos que a veces se manifiestan en la superficie en forma de volcanes de lodo, fumarolas, geysers, manantiales hidrotermales, suelos calientes, etc. (Razo, 1992).

El agua meteórica que se infiltra a través de rocas permeables a grandes profundidades, en ocasiones puede descender varios kilómetros, ser calentada directa o indirectamente por cámaras magnéticas y llegar a constituir yacimientos geotérmicos de alta, media o baja entalpía.

Cuando las cámaras magnéticas son de edades recientes ( menores de un millón de años) y de grandes dimensiones, pueden retener energía calorífica por cientos de miles de años y bajo ciertas condiciones pueden llegar a favorecer la formación de yacimientos geotérmicos de alta entalpía. Los cuerpos magnéticos de escaso tamaño y/o con edades de varios millones de años , generalmente no reúnen condiciones favorables para la formación de tales yacimientos, pero sí para los de baja y media entalpía (Razo, 1992).

El enfriamiento de un cuerpo magnético superficial se produce en tiempos que pueden variar entre los cientos de miles de años a algunos millones de años, según las dimensiones, la temperatura y la profundidad del cuerpo. Por ejemplo, un plutón intrusionado a 20 km de profundidad y con temperatura de 1000 °C llega a cristalizar en un tiempo de 2 a 4 millones de años. Esto implica que las fuentes de calor favorables a la geotermia tendrán que estar

generalmente asociadas a zonas de vulcanismo ácido, de edad preferentemente Cuaternaria. (Razo, 1992).

### ***Características de un campo geotérmico***

Un campo geotérmico susceptible de aprovechamiento, ya sea para producción de vapor con fines de generación eléctrica o bien de agua caliente (baja entalpía) para fines no energéticos, debe tener como principales características:

- Una anomalía térmica.
- Un yacimiento constituido por rocas permeables donde circule fluido geotérmico, situado a profundidades a las que sea económica su explotación.
- Una cobertura impermeable del yacimiento, que impida la pérdida de calor por circulación del fluido geotérmico hacia la superficie.

En las regiones volcánicas, el calor requerido para la formación de un sistema geotérmico cerca de la superficie terrestre puede ser suministrado, esencialmente, por una masa de magma de alta temperatura situada en la corteza terrestre, ya sea como una intrusión en proceso de enfriamiento o bien como una cámara magnética que ha alimentado un volcán. Teóricamente las zonas afectadas por fenómenos volcánicos recientes son localidades geotérmicas potenciales; sin embargo, las áreas de mayor interés son aquellas donde un gran volumen de magma se encuentra a relativamente poca profundidad (menos de 10 km); no así las áreas en las cuales el magma ha ascendido a la superficie directa y rápidamente desde el manto a través de fisuras (originando mesetas de basaltos).

Partiendo de tal observación, deben considerarse áreas potencialmente geotérmicas aquellas donde permanecen localmente grandes volúmenes de magma dentro de la parte superior de la corteza continental, ó donde existen grandes volcanes centrales relacionados con cámaras magnéticas (Organización Latinoamericana de energía, OLADE, 1992).

En la exploración de una zona geotérmica se utilizan estudios vulcanológicos, estructurales, petrológicos, geofísicos, geoquímicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, etc.



Estos estudios ayudan a distinguir centros volcánicos, evaluando su significado en el cuadro estructural regional y estimando su edad con criterios morfológicos o con medidas de edad absoluta mediante métodos radiométricos. La presencia de fumarolas activas en centros volcánicos es una buena indicación de la edad reciente del volcán.

Los estudios petrológicos de lavas y otros productos volcánicos constituyen una ayuda para definir la naturaleza del magma, en particular su grado de acidez y diferenciación. Estos datos son esenciales para evaluar la posible existencia de cámaras magnéticas cercanas a la superficie, las cuales alimentan al vulcanismo; además de que sirven para estimar si la naturaleza del magma implica la presencia de una anomalía térmica superficial dentro de la corteza terrestre. Esto último comprende el caso de magmas formados por anatexis de la corteza, que no es más que la fusión parcial de la corteza superior continental en un proceso que requiere fuertes anomalías térmicas a profundidad moderada (OLADE, 1992).

La formación de cámaras magnéticas de suficiente capacidad térmica, requiere de condiciones tectónicas favorables, como es el cruce de diferentes fallas o la inclinación de bloques fallados que forman trampas apropiadas, donde el magma en ascenso reposa y se produce su diferenciación. Por lo tanto, se debe investigar la relación entre estructuras volcánicas y lineamientos tectónicos a fin de reconocer la posible ocurrencia, a poca profundidad, de cuerpos magnéticos calientes (OLADE, 1992).

Elementos favorables para la existencia de zonas geotérmicas, son: la persistente actividad volcánica a través del tiempo y las frecuentes erupciones de productos fuertemente diferenciados, los cuales requieren para su formación de un largo período de estadía del magma en la cámara. En la mayoría de los casos, las cámaras son grandes depósitos de magma que alimentan a complejos volcánicos centrales, en los que las estructuras volcánicas se forman alrededor de una chimenea central con varias erupciones de productos de diferente composición, genéticamente relacionados unos con otros a través de la cristalización fraccionada.

Actualmente, algunos de los campos geotérmicos en el mundo están localizados en zonas de vulcanismo Cuaternario, constituidos por productos diferenciados (andesitas ácidas, riolitas o dacitas) relacionados con una intrusión ígnea bastante superficial (entre 10 y 15 km), que representa la cámara magnética de centros volcánicos recientes o activos, un ejemplo de esto son los campos geotérmicos de La Primavera y Los Humeros en México, Ahuachapan y Miravalles en El Salvador, Wairakei en Nueva Zelandia y Mahio-Tongonan en Filipinas.

## **1.2 Situación de la Geotermia en México**

México es un país con un potencial geotérmico muy alto y ocupa el tercer lugar mundial en generación de energía eléctrica a partir de este recurso, actualmente se están haciendo trabajos para evaluar y explotar este gran potencial.

El 79% de las anomalías reconocidas en el país tienen como fuente calorífica estructuras volcánicas y subvolcánicas (calderas) relacionadas principalmente, con la Faja Volcánica Mexicana (FVM). Los focos termales del noroccidente de México y los de Baja California Norte (17%) tienen como fuente calorífica, los flujos asociados a la tectónica de fallas de corrientes predominantes en la región. En estas zonas de actividad tectónica, se facilitan los procesos de ascensión de magmas a lo largo de fallas profundas, así como la comunicación de flujo de calor profundo (zonas de gradientes geotérmicos anómalos). Las manifestaciones restantes (4%) se asocian a posibles intrusiones en enfriamiento, correspondiendo a este grupo, las del sur de San Luis Potosí y las de la costa de Guerrero, Oaxaca y Chiapas. (Torres-Rodríguez et al, 1993).

En concordancia con la ubicación fisiográfica de las manifestaciones termales, su distribución en el tiempo marca una predominancia hacia las rocas más jóvenes. Así el 36.7% se asocia a rocas Cuaternarias y el 45.94% a las rocas formadas en el Terciario Superior. El resto (17.9%) corresponde a Terciario Inferior y Cretácico.

Actualmente se tienen cuatro campos geotérmicos en desarrollo, tres de ellos se encuentran en explotación comercial. La figura 1.1 muestra la ubicación y capacidad de cada campo geotérmico.



Figura 1.1 Mapa de Localización de zonas geotérmicas en México

La capacidad geotermoeléctrica instalada a fines de 1994, de 753 MW, representó el 2.4% de la capacidad eléctrica total del país, pero los 5603 GWh generados durante ese

mismo año en los tres campos geotérmicos en producción representaron el 4.2% del total de energía eléctrica producida. Los campos en explotación produjeron 56 millones de toneladas de vapor mediante un promedio de 164 pozos productores, para un consumo específico medio de 10.1 toneladas de vapor por MWh generado, una producción media por pozo de 39 t/h de vapor y un factor de planta de 85.1% en promedio para las plantas geotermoeléctricas en operación en México. Por otra parte se espera aumentar la capacidad instalada en más de un 50% para finales del siglo. (Gutierrez-Negrin, 1995).

Además en el país se dispone de una gran cantidad de recursos naturales: hidrocarburos, hidráulicos, viento, sol, carbon, nuclear, mareas, biomasa, etc. Diversidad que le permite una planeación energética ambientalmente equilibrada.

### **1.3 Campo Geotérmico La Primavera**

El campo geotérmico de La Primavera se encuentra actualmente en etapa de factibilidad, técnicamente es rentable; sin embargo se tienen problemas en materia ambiental. La CFE ha perforado 13 pozos, seis de ellos han sido evaluados, confirmándose una producción de vapor suficiente para instalar de inmediato dos unidades de 5MW cada una. En este campo las actividades exploratorias de la CFE fueron suspendidas desde 1989; no obstante, desde esa fecha y hasta 1993 se llevó a cabo un programa de restauración de los impactos ambientales.

La CFE publicó algunos datos técnicos del campo geotérmico La Primavera a principios de 1995 y son citados en la tabla I.1.

**Tabla 1.1 Parámetros técnicos en el campo geotérmico La Primavera**

<b>Capacidad geotermoelectrica instalada</b>			
Capacidad actual	MW adicionales (simulación numérica)	MW adicionales (análisis volumétrico)	
0	75	120	
<b>Nuevos proyectos geotermoelectricos</b>			
Proyecto	Capacidad (MW)	Costo (millones USC)	Fecha de operación
Unidades 1 y 2	2 x 5	5.4	Jun 1996
Unidades 3 y 4	2 x 20	56.6	Oct 1999
<b>Pozos necesarios para los proyectos</b>			
Proyecto	Capacidad (MW)	Pozos a perforar	Pozos a reparar
Unidades 1 y 2	2 x 5	0	2
Unidades 3 y 4	2 x 20	7	3

FALLA DE ORIGEN

## **II. AREA DE ESTUDIO.**

### **II.1 Antecedentes.**

Las fuentes documentales consultadas acerca del área de estudio para la realización de esta tesis proceden, en su mayor parte, de informes realizados por la Comisión Federal de Electricidad (Gutiérrez-Negrín, 1991, 1995; Venegas 1986; López-Hernández, 1991; Tello-Hinojosa, 1991; Ramírez-Silva, 1990; Cerriteño, 1991, etc) así como publicaciones hechas por Mahood y colaboradores (1980, 1981).

Las referencias consultadas fueron principalmente de carácter vulcanológico y tectono-estructural así como algunos estudios geoquímicos y geofísicos.

### **II.2 Localización Geográfica y Fisiográfica.**

El área de estudio abarca una superficie aproximada de 600 km<sup>2</sup> y se encuentra ubicada en la porción centro-norte del estado de Jalisco, 20 km al Oeste del centro de la ciudad de Guadalajara y entre las coordenadas geográficas 103° 20' y 103° 45' de longitud W, y 20° 30' y 20° 45" de latitud N. Tiene una altitud que varía desde 1500 msnm en el valle de Toluquilla hasta una altitud de 2200 msnm en los Cerros Las Planillas.

Los poblados más importantes cercanos a la zona son la ciudad de Guadalajara que limita la sierra de La Primavera hacia el E; Tala, un pequeño poblado que limita la sierra hacia el W. En el límite N-NW se encuentra el Volcán de Tequila y hacia el S el Cerro Totepec, en el estado de Jalisco. Las principales vías de acceso son la carretera federal No 15 que cruza el área de E a W y de N a S. (Figura II.1).

Fisiográficamente el campo geotérmico La Primavera se encuentra en la intersección de las provincias de la Faja Volcánica Mexicana (FVM) y la Sierra Madre Occidental (SMO); sin embargo de acuerdo con sus características petrológicas y su edad se le ha relacionado con la primera, y por lo tanto, fue en donde se hizo mayor énfasis en la recopilación bibliográfica.

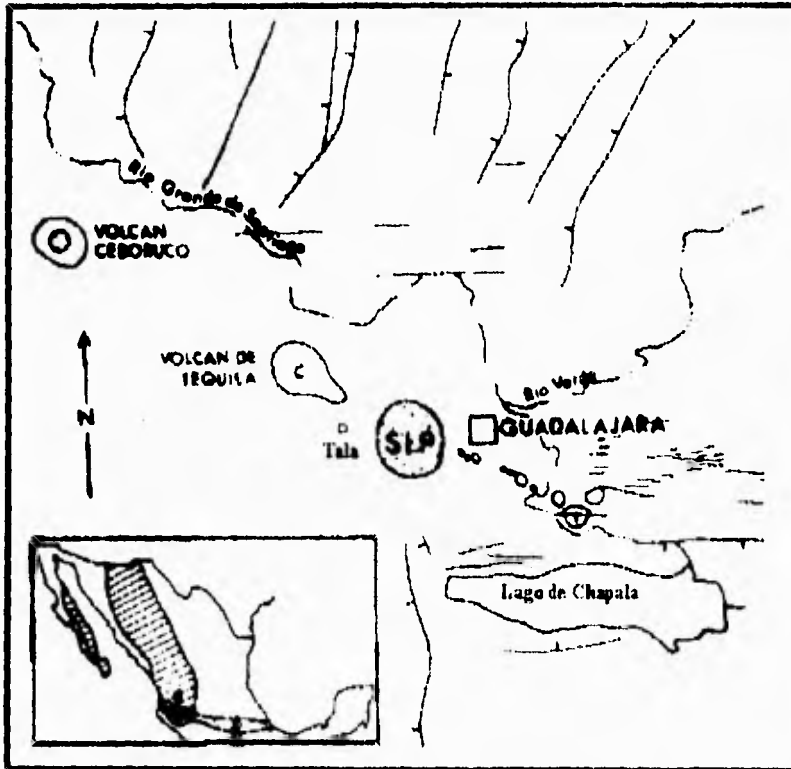


Figura 1.1 Localización geográfica y fisiográfica de la Sierra de La Primavera  
(Tomada de Mahood, 1980).

La Faja Volcánica Mexicana consiste de un gran número de conos cineríticos, mares, domos y estratovolcanes de edad Terciaria-Cuatemaria, que se encuentran distribuidos a lo largo de una franja de orientación aproximada E-W; desde Puerto Vallarta en el Pacífico, hasta el Citlaltépetl en la dirección de la costa del Golfo de México. La

FALLA DE ORIGEN

composición química y mineralógica de las rocas asociadas a la FVM pertenecen principalmente a la serie calco-alcalina (Verma, 1987).

Se han propuesto distintas teorías para el origen de las rocas volcánicas de la FVM, la mayoría de los autores la relacionan con la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa Norteamericana (Demant, 1982).

### **II.3 Geomorfología e Hidrografía.**

La geomorfología de la zona presenta principalmente rocas volcánicas con relieve abrupto, se tiene gran cantidad de aparatos volcánicos con abundantes derrames asociados a domos, conos de escoria y la caldera de colapso donde se encuentra localizado el campo geotérmico. Se presentan procesos exógenos manifestados por depósitos y productos de intemperismo como material aluvial, suelos y sedimentos lacustres. También se encuentran procesos endógenos manifestados por la misma presencia de los aparatos volcánicos así como actividad tectónica. El drenaje predominante en el área es de tipo radial controlado estructuralmente por cuerpos volcánicos circulares

Desde el punto de vista hidrográfico, el área de estudio se encuentra cercana al parteaguas de tres sistemas, como son las cuencas del Río Grande de Santiago, del Río Ameca y del San Marcos.

Al occidente del campo geotérmico se encuentra el Río Caliente, afluente del Río Ameca, el cual se origina en los manantiales denominados Río Caliente, Agua Brava y Agua Verde, por citar a los más importantes.

La zona de recarga o acuífero se constituye por rocas volcánicas cuaternarias permeables pertenecientes a la Toba Tala. (Ramirez-Silva, 1990). Las rocas volcánicas terciarias, como son las riolitas, ignimbritas del Mioceno, así como las andesitas del Oligoceno poseen baja permeabilidad, por lo tanto constituyen y funcionan como horizontes impermeables o confinantes.(Ramirez-Silva, 1990).



### **III. MARCO GEOLOGICO**

#### **III.1 Generalidades**

El campo geotérmico de La Primavera, Jalisco, México, está asociado a una caldera riolítica del Pleistoceno, situada en la sierra del mismo nombre al W de la ciudad de Guadalajara. Consiste de flujos de lavas, domos de composición riolítica, tobas de flujo de cenizas, pómez de caída libre y sedimentos lacustres en el interior de la caldera (figura III.1).

De forma general se trata de una caldera con volcanismo ácido, situada en un centro de dispersión tectónica que ha estado sujeta a procesos de combantiento y colapso, los cuales han originado un intenso fracturamiento en las rocas.

#### **III.2 Tectónica Regional**

Desde el punto de vista volcano-tectónico regional, la sierra de La Primavera se ubica en la porción occidental de la Faja Volcánica Mexicana, región que se caracteriza por su proximidad al punto de unión de tres placas, la de Norteamérica, la del Pacífico y la de Cocos-Rivera. Esto ha propiciado la formación de un sistema volcano-estructural muy complejo, relacionado directamente con el comportamiento dinámico de la tectónica de placas durante los últimos 5 Ma cuando se inició la apertura del Golfo de California (Atwater, 1970). En esta zona convergen tres sistemas estructurales muy importantes (figura III.2): el graben de Chapala, con una dirección E-W, el graben de Colima, con orientación N-S; y el graben de Tepic-Zacoalco con dirección NW-SE. especialmente en los dos últimos, se ha desarrollado desde el Plioceno una intensa actividad volcánica, más notoria durante el Cuaternario con la formación de grandes volcanes complejos acompañados de numerosos conos monogenéticos. (López-Hernández, 1991).

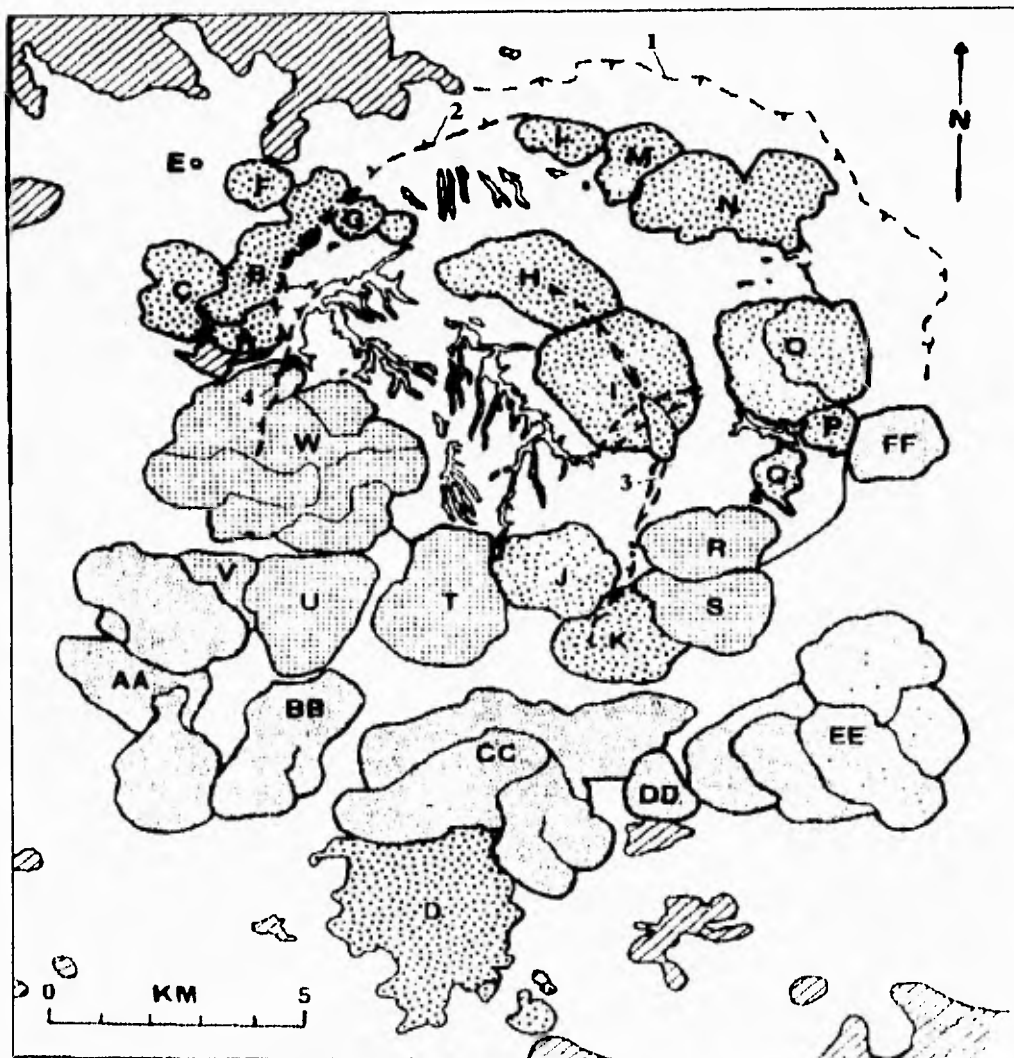
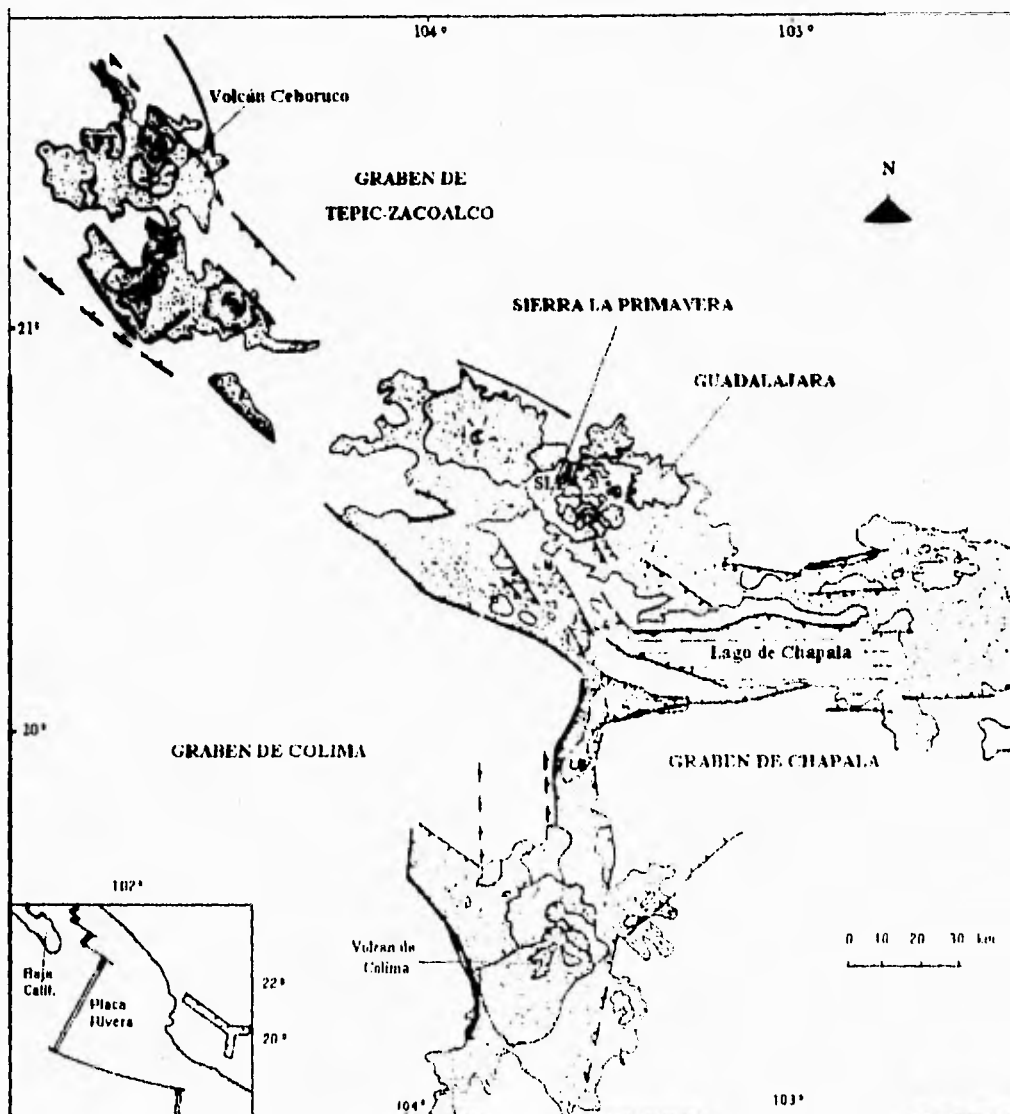


Figura III.1 Mapa Geológico de la Sierra La Primavera (Modificado de Mahood, 1980).

Líneas diagonales: Rocas volcánicas pre-primavera; Símbolos en V: lavas pre-caldera; en blanco: Toba Tala; punteado rectilíneo: segundo anillo de domos; punteado simple: lavas arco sur; A: Domo Río Salado; B: Flujo Cañón de Las Flores; C: Domo Mesa El León; D: Grupo Arroyo El Saucillo; E: Mesa El Chiquihuitillo; F: Domo Mesa El Burro; G: Domo Cerro Chato; H: Domo Cerro Alto; I: Domo Mesa El Nejahuete; J: Domo Cerro El Tule; K: Domo El Madrón; L: Domo Pinar de la Venta; M: Domo Arroyo La Cuartilla; N: Domo Mesa La Lobera; O: Domo Cerro El Chapulín; P: Domo Dos Coyotes; Q: Domo Arroyo Las Pilas; R: Domo Arroyo Estatuante; S: Domo La Cuesta; T: Domo Cerro El Culebreado; U: Domo La Puerta; V: Domo Arroyo Las Animas; W: Cerro El Pedernal; AA: Cerro San Miguel; BB: Flujo Llano Grande; CC: Cerros Las Planillas; DD: Domo Arroyo Colorado; EE: Cerro El Tajo; FF: Domo Cerro El Colli; Las fallas en líneas punteadas; 1: Falla La Gotera; 2: Falla Anillo Calderico; 3: Falla Mesa El Nejahuete; 4: Falla Río Caliente.

FALLA DE ORIGEN



**Figura III.2** Mapa Tectónico Regional de La Sierra La Primavera  
Sierra La Primavera (SLP). (Tomada de López-Hernández, 1991)

FALLA DE ORIGEN

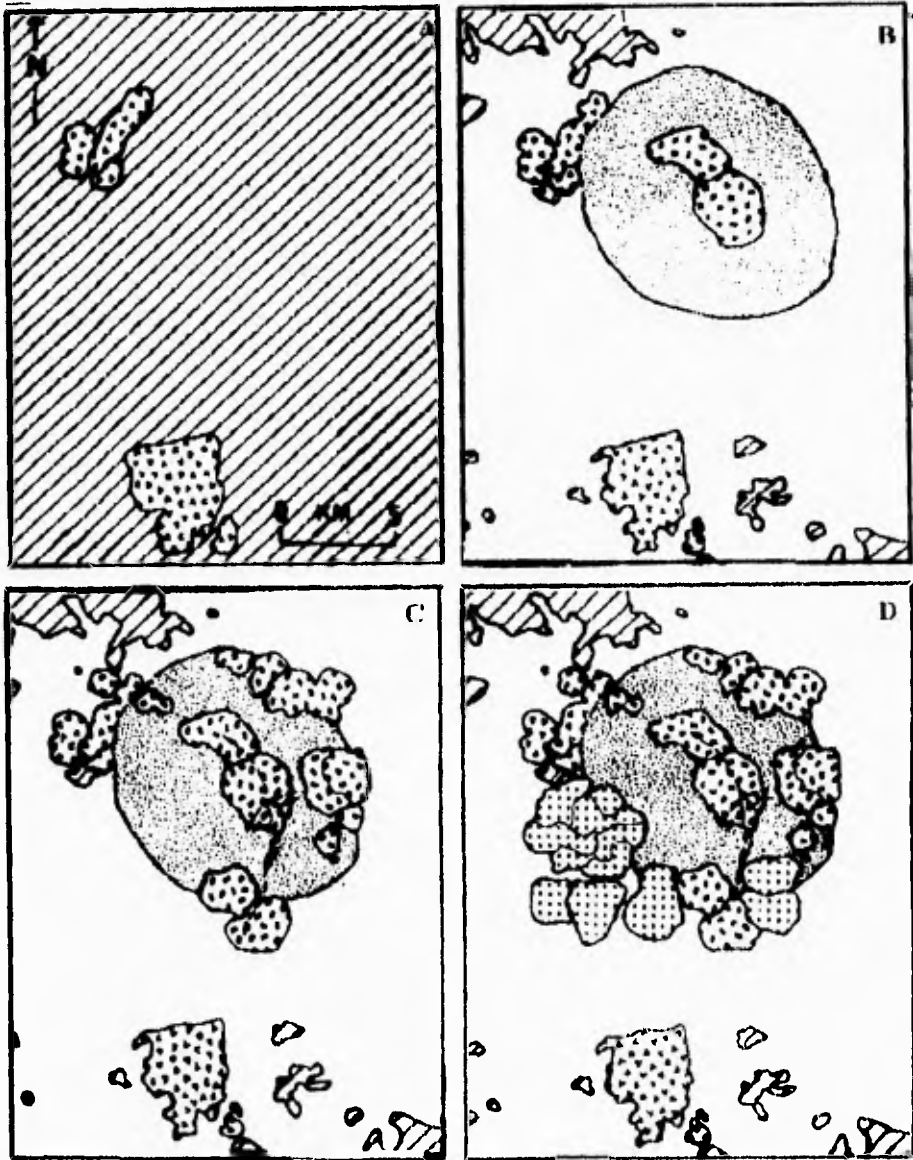
### III.3 Evolución Geológica de la Sierra La Primavera

Hace aproximadamente 120,000 años se inició la actividad relacionada con este centro volcánico; se extrasaron los primeros domos riolíticos en la porción NW del área que fueron seguidos por una erupción hace 95,000 años que produjo aproximadamente 20 Km<sup>3</sup> en forma de flujos piroclásticos pertenecientes a la Toba Tala la cual muestra zoneamiento composicional. Al extruir un volumen considerable de material el techo de la somera cámara magmática se colapsó formando una caldera de 11 Km de diámetro iniciándose en seguida la formación de sedimentos lacustres intracaldera de espesores de hasta 30 m de sedimentos finos. Las erupciones continuaron hace 75,000 años, con un nuevo grupo de domos de anillo que erupcionaron en la margen sur del lago. Estos domos están relacionados con espesores de sedimentos de 10 a 20 m, como resultado del levantamiento debido al empuje del nuevo magna en la cámara, lo que dió fin al periodo de depositación de sedimentos lacustres. Este levantamiento culminó con la erupción de lavas africanas a lo largo del arco sur, la que comenzó hace aproximadamente 60,000 años. Las lavas más jóvenes erupcionadas en esa región ocurrieron hace 25,000 años aproximadamente (figura III.3).

Los fechamientos en el área fueron realizados por Mahood (1980) por el método de K-Ar en el laboratorio de U.C. Berkeley dando rangos que varían de 20,000 a 125,000 años y se presentan en la tabla III.1

**Tabla III.1 Edades y eventos de la Sierra La Primavera** (Tomada de Mahood, 1980)

<i>EDAD</i>	<i>EVENTO</i>
120,000-100,000 años	Erupción de lavas pre-caldera:
95,000 años	Erupción de la Toba Tala Colapso de la Caldera Erupción de los domos centrales y depositación del horizonte de pomez gigante.
95,000 años	Primera erupción de domos anulares
75,000 años	Segunda erupción de domos anulares Levantamiento
60,000-20,000 años	Erupción de lavas del arco sur



**Figura III.3** Evolución Geológica de la Sierra La Primavera (Tomada de Mahood, 1980).

Líneas diagonales: Rocas volcánicas pre-Primavera. Símbolo en V: Lavas pre-caldera; En blanco: Toba Tala; Líneas dobles: Domos centrales y primeros domos anulares; (A) Hace 100,000 años se emplazaron las lavas pre-caldera. (B) Hace 95,000 años erupcionó la Toba Tala, se colapsó la caldera y se emplazaron los domos centrales en medio de un lago. (C) Hace 90,000 años se emplazaron los segundos domos anulares. (D) Hace 65,000 años se extrusó el segundo anillo de domos.

### ***Lavas Precaldera.***

Hace aproximadamente 120,000 años erupcionaron las primeras lavas de la Sierra de La Primavera creándose los primeros domos riolíticos en la porción NW del área: El Cañón de las Flores, Mesa el León y Río Salado. Estos dos últimos se observan claramente cubiertos por la Toba Tala, pero la relación estratigráfica de la ignimbrita con la Mesa El León no es muy evidente. Estas lavas pueden ser afiricas o poídicas y contienen aproximadamente 10% de fenocristales con sanidino, cuarzo, ferrohedenbergita, fayalita e ilmenita (Mahood, 1980).

### ***Erupción de la Toba Tala.***

Las edades de K-Ar indican que hace 95,000 años se produjo una importante erupción pliniana, acompañada de nubes ardientes que dieron lugar a la extrusión de una ignimbrita y a pómez de caída libre. La ignimbrita fue denominada Toba Tala y se distribuyó en un área de 700 km<sup>2</sup>. Su composición química es riolítica, ligeramente zoncada, de peralcalina en su fase inicial a metaluminosa al término de la erupción (Mahood, 1980).

El espesor de la Toba Tala varía de 0 a 70 m en el exterior de la estructura caldérica y de 200 a 700 m en el interior según datos obtenidos en pozos de la Comisión Federal de Electricidad.

Mahood (1980) calculó un volumen de 20 km<sup>3</sup>, sin embargo López-Hernández (1991) señaló que el volumen podría ser de aproximadamente 32 km<sup>3</sup> de acuerdo a nuevos datos arrojados por la perforación.

Mahood (1980) separa a la Toba Tala en tres paquetes principales de los cuales sólo el primero rebasó los límites de la caldera.

El primer emplazamiento representa aproximadamente el 90% del volumen total de la Toba Tala aflorante. Se caracteriza porque contiene pómez blanca afirica, su grado de

compactación es variable pero en general está incipientemente soldada. Rellena las cuencas circundantes en áreas externas a la caldera y se emplazó en tres direcciones principales: hacia el W se localiza más allá del poblado de Tala, al NE cubre la zona NW de la ciudad de Guadalajara, hacia el S no se observa claramente su límite, pero podría llegar hasta las faldas del cerro Totepec.

El segundo paquete es de aproximadamente 10 m de espesor y está compuesto por pómez afírica y pómez gris de tamaño de lapilli con cuarzo y sanidino muy esparcidos, y por pómez bandeada también de tamaño lapilli. Independientemente de su color oscuro, la pómez gris es de la misma composición que la pómez blanca del tercer miembro sobreyacente. Sus contactos con los miembros inferior y superior son transicionales.

El tercer miembro de la Toba Tala es de 5-10 m de espesor y está caracterizado por pómez blanca del tamaño de lapilli, la cual contiene menos de 1% de cuarzo y sanidino en una matriz de ceniza de color rosada. En muchos lugares el tercer miembro muestra una interstratificación de flujos de ceniza y tobas de caída aérea.

### ***Colapso de la caldera.***

Wright (1981) calculó entre 15 y 30 días el tiempo que duró la evacuación de los productos provocando el colapso del techo de la cámara magmática que alimentó a la ignimbrita. Esta subsidencia ocurrió en forma de escalones anulares y no como una falla única, tal y como se observa en información recabada por López-Hernández (1991) y en pozos perforados por CFE.

El hecho de que la ignimbrita tenga un espesor mucho más importante en la zona central, se debe a la suma de dos fenómenos: el colapso del techo de la cámara magmática pudo haber sido simultáneo a la emisión de la ignimbrita, lo cual ocasionó que la mayor parte quedara atrapada dentro de éste; al mismo tiempo la ignimbrita parece haber tenido una baja dispersión lateral ocasionada por un bajo contenido de gases (Wright, 1981).

### ***Erupción de los domos centrales y deposición del horizonte de pómez gigante.***

Inmediatamente después de los depósitos plinianos asociados a la Toba Tala se inició la erosión. En la zona limitada por las fallas caldéricas se formaron angostos cañones de poca profundidad, que fueron rellenados por depósitos fluviales ricos en pómez y derivados de la erosión de la Toba Tala, sólo algunas lentes de pómez de caída libre fueron preservados. Mahood (1980) sugirió que los rasgos erosivos fueron causados por una etapa tardía "surge blast", ya que en una parte de los canales observados en la ignimbrita no se encuentran rellenos de depósitos fluviales. La presencia de la zona de falla anular, asociada al colapso, impidió que la cuenca drenara hacia el exterior, por lo cual se formó un lago de aproximadamente 10 km de diámetro según lo indica la cartografía de los depósitos.

El paquete de sedimentos está formado por tres niveles, dos de ellos arcillosos, separados por un horizonte que se caracteriza por la presencia de pómez gigante (en promedio 2.5 m de diámetro). El paquete inferior en su parte más baja contiene una gran cantidad de pómez retrabajada, por lo general la estratificación es muy fina, las capas varían de 10 a 20 m de espesor y en ocasiones se observa una estratificación cruzada. El espesor de esta unidad está controlado por una subsidencia irregular que originó la acumulación de espesores que varían de 0 a 25 m. (Mahood, 1980).

El horizonte poco usual de pómez gigante se formó por el desprendimiento de la cubierta pumicítica de algunos domos que se emplazaron dentro del lago. Mahood (1980) consideró con base en su tamaño que provienen del domo El Nejahuete; sin embargo, López Hernández (1991) encontró evidencias de campo para afirmar que la pómez gigante también proviene de la corteza de otros domos (Las Pilas e Ixtahuatonte).

En la zona central y alrededores de la cuenca se inició el emplazamiento de domos aprovechando la zona de debilidad. Paralelamente continuó la acumulación de sedimentos finos y fue interrumpida por el aporte de material piroclástico derivado de la actividad explosiva de los domos (Mahood, 1980).



### ***Primera erupción de domos anulares.***

Poco después de la emisión de la Toba Tala se emplazaron los domos C. Alto, C. Chato y Mesa del Burro (hace aproximadamente 95,000 años según edades radiométricas).

Simultáneamente se extravasaron, sobre el anillo formado por la falla caldérica, otros domos riolíticos, sobre todo en la mitad E de la estructura (domos Pinar de la Venta, Mesa la Lobera, C. el Chapulín y El Tule). En general estos aparatos se caracterizan porque tienen 10% de fenocristales y en conjunto alcanzan un volumen de 5 km<sup>3</sup> de magma (Mahood, 1980).

### ***Segunda erupción de domos anulares.***

Hace aproximadamente 75,000 años se inició un segundo periodo de emplazamiento de domos (El Pedernal, Agua de Victoriano y El Culebreado) sumando un volumen de 3km<sup>3</sup> de magma. En este periodo las lavas emitidas fueron alicricas y porfídicas y, exceptuando al domo El Pedernal, los demás son monogenéticos (Mahood, 1980).

### ***Levantamiento***

Al término de la erupción de los domos antes descritos se inició el levantamiento de la parte central de la caldera. La configuración de la base de la pómez gigante (Mahood, 1980) sugiere que este levantamiento fué más conspicuo hacia la zona sur de la estructura, excepto en la zona de Río Caliente. Por este motivo, en la actualidad no existen evidencias contundentes de la geomorfología original de la caldera, pues todos los rasgos fueron destruidos durante el proceso.

El hecho de que los todos los domos emplazados sobre el anillo caldérico muestren que fueron emplazados sobre una superficie horizontal y actualmente se encuentren inclinados y que a su vez las coladas viscosas del anillo sur muestren clara indicación de haber fluido sobre un plano inclinado, sugieren que el levantamiento se produjo al finalizar el segundo periodo de domos anulares y antes de la erupción de las

coladas más recientes del anillo sur. Según los datos radiométricos este fenómeno pudo haber ocurrido hace aproximadamente 65,000 años.

La máxima deformación debida al levantamiento se produjo sobre todo en las márgenes del lago. Las inclinaciones de estos depósitos varían de 10° a 20°, en tanto que en la zona central tienen sólo 2°. En opinión de Mahood (1980), la ausencia de fallas de grandes dimensiones revelan que el levantamiento ocurrió en forma de pistón, y estima que la zona fué elevada cuando menos 260 m, tomando como referencia la altura actual de las planicies aledañas.

#### ***Erupción de lavas del arco sur***

Sobre una falla anular paralela al colapso caldérico se extravasaron aproximadamente 7 km<sup>3</sup> de lavas afíricas de composición riolítica que fluyeron radialmente de cada uno de estos centros: San Miguel, Las Planillas y El Tajo. La efusión de estas lavas fué precedida por emisión de piroclastos que cubrieron sobre todo el SE de la Sierra y el NW de la Ciudad de Guadalajara (Walker et al, 1981).

Tomando como referencia las edades radiométricas, el vulcanismo se inició hace aproximadamente 65,000 años y es más reciente hacia el Este. En El Tajo y El Colli se registraron edades entre 25,000 y 30,000 años (Mahood, 1980); la juventud morfológica de estas unidades concuerda con los datos obtenidos por López-Hernández (1991).

### **III.4 Geología Estructural**

A pesar de que el centro eruptivo de La Primavera tiene gran influencia tectónica, las fallas principales que se tienen responden únicamente a las etapas de máxima deformación del ciclo caldérico (colapso y levantamiento). Mahood (1980) sólo menciona 4 sistemas de fallas (figura III. 1) y los agrupa en dos tipos, los relacionados al colapso y los relacionados al resurgimiento. A continuación se describe cada sistema principal.

### ***Falla del Anillo Caldérico***

Es la falla más importante y más antigua de la sierra de La Primavera. Sin embargo solamente se observan 5 km de su traza en la zona de Río Caliente, donde corta a los domos El Salado y Cañón de las Flores y presenta un escarpe de 50 m. Su continuación se infiere por el rasgo circular que forma el anillo de los domos ubicados al N, NE, S y SE, el cual sugiere indirectamente la presencia de una importante zona de debilidad que fue utilizada por el magma para ascender a la superficie y generar estructuras dómicas. La presencia de un pequeño graben arqueado en la cima de los domos localizados en la porción sur del anillo caldérico, El Culebreado, El Tule, Ixtahuatonte, Las Pilas y El Capulín, reafirma la existencia de esta falla anular ya que debió formarse cuando el magma se retiró del conducto alimentador por falta de presión dentro de la cámara magnética (Clough, 1981).

López-Hernández (1991) señaló otra evidencia de la forma circular observando la cartografía de los depósitos lacustres, los cuales sólo pudieron haberse acumulado en una cuenca limitada por las fallas anulares del colapso caldérico.

### ***Falla Río Caliente***

Esta falla tiene una traza arqueada que coincide prácticamente con la falla caldérica, pero tiene un desplazamiento invertido debido a que se relaciona con el levantamiento. Su longitud es de aproximadamente 8 km, se extiende desde la Venta del Astillero hasta la zona de Río Caliente, donde alcanza su expresión máxima de 100 m de escarpe. Por su relación con el levantamiento, debido al aporte de nuevo magma que alimentó a los domos del anillo sur, se le calculó una edad de 60,000 años (Mahood, 1980).

### ***Falla Mesa El Nejahuete.***

Es una falla con una traza de 9 km que corre desde Cerro Alto hasta el sur del Cerro El Tule, su traza se puede continuar hacia el SSE por la presencia de un cráter de explosión freática y un derrame fisural de riolita (López-Hernández, 1991). Mahood (1980)

incluye un par de fallas perpendiculares localizadas en el límite sur del cerro Nejahuete, que forman el graben de Cerritos Colorados, de 2 km de largo por 0.5 km de ancho, cuyo desnivel es de aproximadamente 40 m.

### ***Falla La Gotera***

Al norte del anillo de domos antiguos se localiza un escarpe arqueado de trazo irregular de 13 km de longitud y 20 m de salto, que va desde el Cerro El Colli hasta el este de la población La Gotera considerada como una falla paralela al colapso que se pudo haber formado poco después de éste (Mahood, 1980). Sin embargo, López-Hernandez (1991) señala que podría tratarse de un rasgo morfológico, producido por la erosión diferencial de los materiales.

Por otra parte Venegas y colaboradores (1978) definieron la presencia de un área de aproximadamente 7 km<sup>2</sup> donde se presenta un intenso fracturamiento y fallamiento de pequeñas dimensiones, localizada al sur del C. Nejahuete con dirección predominante NE-SW y que coincide con la zona de actividad hidrotermal.

López-Hernandez (1991) realizó un análisis microestructural en el área detectando un gran número de fallas de tipo normal de poca magnitud y poco desplazamiento concentradas en la zona de Cerritos Colorados asociadas a una intensa actividad fumarólica.

### **III.5 Sistema Geotérmico.**

Al igual que muchos centros silíceos jóvenes, en la Sierra de la Primavera se tiene un sistema hidrotermal activo. A lo largo del Río Caliente se tienen numerosos manantiales promediando 65° C de temperatura y sumando aproximadamente 400 l/s de descarga (Gutiérrez-Negrín, 1991).

Según su composición química, el agua de estos manantiales es de tipo sódico-bicarbonatada. La presencia de elementos de circulación profunda como boro, litio y

arsénico en estos manantiales se debe a la mezcla entre aguas frías de origen meteórico de reciente infiltración y fluidos más calientes de origen magmático. De acuerdo con el modelo de mezcla se supone que existe una relación de 4:1. Las temperaturas a las cuales se lleva a cabo el equilibrio varían entre 180 y 220°C (Tello-Hinojosa et al., 1991).

Se han podido identificar, a partir de muestras de canal y de núcleos, minerales típicos de alteración hidrotermal como epidota, calcita y pirita reportadas por Gutierrez-Negrín (1983) así como clorita, laumontita, heulandita, siderita, yeso y wairakita en pozos perforados por JICA (1989).

Superficialmente se encontraron montmorillonita y caolinita determinados por difracción de rayos X (JICA, 1989). Además se tienen numerosas fumarolas que emanan de los bordes de la falla Mesa El Nejahuete, donde se tiene una fuerte alteración ácida. Al SW de esta falla, en el contacto de la Toba Tala con los sedimentos lacustres, se observan cientos de pequeñas fumarolas que producen silicificación en la Toba; en tanto que en La Azufre se tienen depósitos de sulfuros también asociados a fumarolas.

## IV CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS DE PERCEPCION REMOTA.

### IV.1 Introducción

Existen principalmente dos maneras de obtener información acerca de los recursos naturales. Dicha información puede ser obtenida 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 medios de percepción remota utilizan dispositivos que no se encuentran en contacto físico con éste, utilizando variaciones en la distribución de diferentes parámetros para la obtención de datos. Los dispositivos llamados sensores detectan la intensidad de la radiación electromagnética. La energía electromagnética representa de esta forma el enlace entre los sensores y el fenómeno en estudio localizado a distancia. Estos sensores adquieren datos sobre los rasgos de la superficie terrestre que emiten o reflejan la energía electromagnética, que al ser analizados proporcionan información acerca de su textura y composición. En la figura IV.1 se muestra el espectro electromagnético.

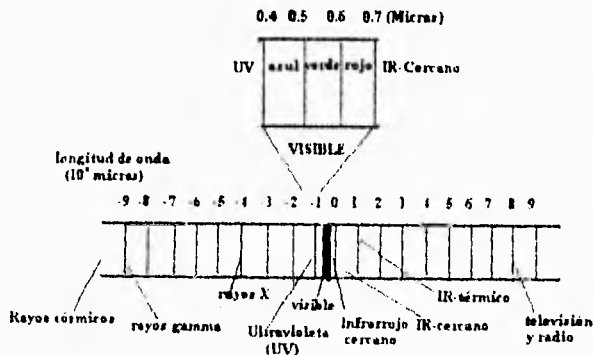


Figura IV.1 Espectro electromagnético

## **IV.2 Interacción de la radiación electromagnética 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 por 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 de los sistemas de sensores remotos. Los efectos netos de la atmósfera varían de acuerdo al espesor de la misma que cruce la energía, a 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 es un fenómeno en el cual la radiación electromagnética se propaga por partículas de la atmósfera en direcciones preferenciales. La dispersión *Rayleigh* es común cuando la radiación interactúa con las moléculas atmosféricas y es característico en longitudes de onda cortas (p.e. azul). Este tipo de dispersión le da un color característico al cielo. Otro tipo es la dispersión *Mie*, la cual influye en partículas con diámetro igual a la longitud de onda captada por el sensor. Por último existe otro fenómeno llamado dispersión *no selectiva* la cual se produce cuando el diámetro de las partículas que causan la dispersión son más grandes que las longitudes de onda detectadas.

La absorción atmosférica, por el contrario, es el resultado de la pérdida de energía debido a los constituyentes atmosféricos. Entre los más efectivos absorbentes de la radiación solar se encuentran el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono.

## **IV.3 Interacción de la radiación electromagnética con suelo, roca y vegetación.**

Cuando la radiación electromagnética incide sobre un material, la energía de esta puede ser transmitida, absorbida o reflejada por el material. Sin embargo la propiedad más

importante para muchos sistemas de percepción remota es la cantidad de luz reflejada que dividida entre el total de la radiación electromagnética recibe el nombre de *reflectancia*.

Las características de reflectancia de los elementos que componen la superficie terrestre pueden ser cuantificados midiendo la porción de energía incidente que es reflejada y medida en función de la longitud de onda es llamada *reflectancia espectral*.

En los estudios geológicos las interacciones de la radiación electromagnética con el suelo y las rocas son de mucha importancia. Sin embargo, la interacción de la radiación electromagnética y la vegetación es también importante, porque áreas extensas de la superficie están cubiertas por vegetación, la cual oscurece la respuesta espectral de los otros materiales que componen la superficie (Ruíz-Armenta, 1994).

#### ***Interacción con la vegetación.***

El color verde característico de la vegetación se debe a la clorofila, ésta absorbe en el rango del espectro visible al azul y al rojo teniendo los rasgos de reflectancia de 0.52 a 0.68  $\mu\text{m}$  (figura IV.2). 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  $\mu\text{m}$  y la meseta del infrarrojo es llamada *límite rojo* y su inclinación se relaciona con las concentraciones de clorofila en las hojas. La reflectancia entre 1.6 y 2.2  $\mu\text{m}$  indica el contenido de agua en las hojas y el agua presente en ellas hace que absorban energía entre 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$ .

Las diferentes estructuras de las hojas, proporción en la 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



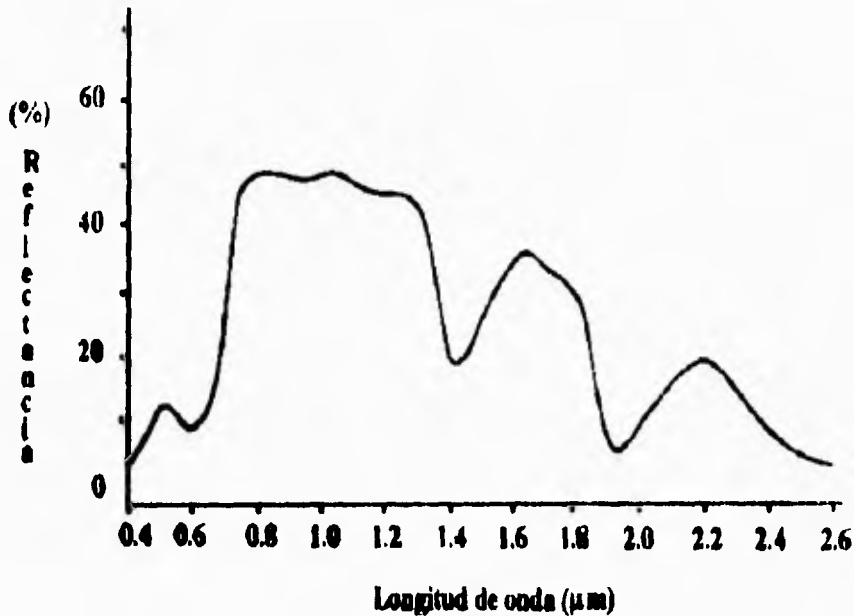


Figura IV.2 Curva de reflectancia espectral de la vegetación

### ***Interacción con suelos y roca***

Los espectros de reflectancia característicos de las rocas y minerales en las diferentes regiones del espectro electromagnético son el resultado de sus propiedades físicas y químicas. Los rasgos espectrales de las rocas se derivan de procesos a niveles atómicos y moleculares (Hunt, 1977) 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 el rasgo característico del mineral con mayor concentración dominará el espectro de la roca. De acuerdo a los objetivos de la presente tesis, se hizo énfasis en el estudio de los minerales característicos en las rocas que han sufrido alteración hidrotermal. Existen dos grupos de minerales que son característicos de este tipo de alteración en yacimientos geotérmicos: los hidroxilos (arcillas y micas) y los sulfatos hidratados (yeso y alunita). Algunos de estos minerales se forman únicamente durante los procesos de alteración hidrotermal.

En la figura IV.3 se presenta la curva de reflectancia espectral de minerales hidrotermales importantes en exploración geotérmica como son las arcillas, los sulfatos y los filosilicatos. Todos estos minerales tienen un especial comportamiento espectral en la región entre 1.1 y 2.5  $\mu\text{m}$ , el cual se caracteriza por tener altos valores de reflectancia alrededor de 1.65  $\mu\text{m}$  y rasgos fuertes de absorción alrededor de 2.2  $\mu\text{m}$ .

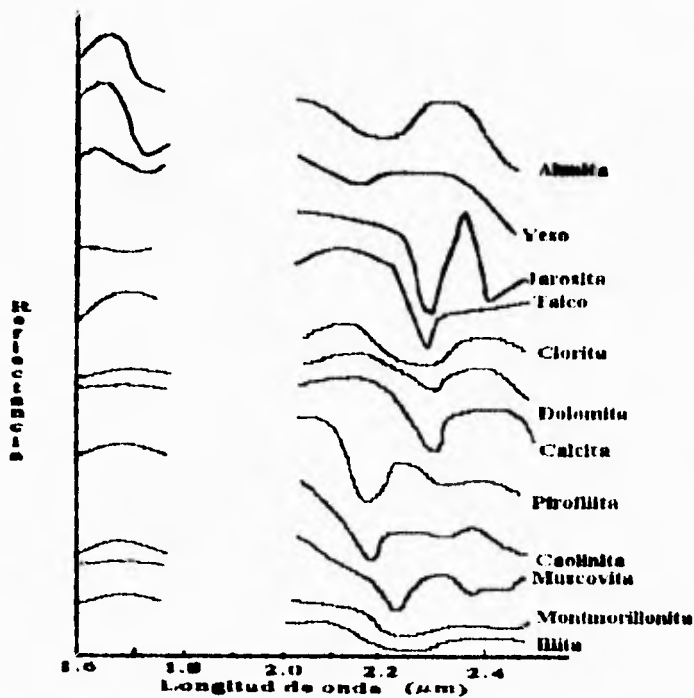


Figura IV.3 Curva de reflectancia espectral de los hidroxilos

### *Firma 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 los materiales específicos del terreno en diferentes longitudes de onda son también llamadas firmas espectrales. Muchos de los materiales del terreno manifiestan características de reflectancia muy distintivas. 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 que pueden ser semicuantitativos pero no necesariamente únicos (Hunt, 1977).

#### **IV.4 Características de la imagen y los sensores Lansat MSS y TM.**

El término de imagen es usado para designar la representación pictórica de la radiación electromagnética que es captada por un sensor. Las imágenes de percepción remota son una función  $f(x,y)$ , que es discretizada tanto en coordenadas espaciales como en valores de brillantez. Se puede considerar que una imagen es una matriz en la que los índices de 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 *picture elements* (elementos de la imagen) que se abrevia como *pixels* y representan un rango de longitud de onda.

Algunas imágenes son mediciones de la distribución espacial de la radiación solar reflejada en los rangos de longitudes de onda del ultravioleta, visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Otras son mediciones de la distribución espacial de la energía emitida por la Tierra misma y otras miden el regreso relativo de la energía transmitida por los satélites desde la superficie de la Tierra. Sistemas de este tipo son llamados *sistemas activos* dado que la fuente de energía es proporcionada por el sistema, en comparación con las mediciones que dependen de una fuente externa de energía (como el sol), conocidos como *sistemas pasivos*. Debido a las necesidades y características del presente trabajo se optó por utilizar este último sistema.

Los sistemas ópticos tienen la capacidad de distinguir señales espacialmente cercanas o espectralmente similares, esta propiedad es llamada *resolución* y existen cuatro tipos: *resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal*.

Swain y Davis (1978) definen la resolución espacial como una medida de la separación lineal y angular entre dos elementos que pueden ser detectados por el sensor que no es más que el tamaño del pixel en metros equivalentes del terreno proyectado en el campo instantáneo de vista (IFOV) del sensor. Por ejemplo para el Landsat Thematic Mapper (TM) la resolución espacial de terreno es aproximadamente 30 x 30 m.

La resolución espectral se refiere a la dimensión y número de intervalos de longitudes de onda del espectro electromagnético que pueden ser captados por el sensor. La resolución temporal de un sensor se refiere al intervalo de tiempo en que el sensor toma imágenes de un área en particular

La capacidad 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 subniveles discriminables en la señal, por ejemplo el sensor Multispectral Scanner (MSS) puede discriminar hasta 128 tonos de grises en tanto que el sensor Thematic Mapper alcanza a separar hasta 256 tonos diferentes de grises.

### ***Sistemas de sensores remotos Landsat.***

La serie Landsat está conformada por un total de 5 satélites que fueron diseñados especialmente para el estudio de los recursos naturales desde el espacio. Hasta el momento se han combinado tres tipos diferentes de sensores. Estos son el sistema de cámaras *Return Beam Vidicom* (RBV), los sistemas *Multispectral Scanner* (MSS) y *Thematic Mapper* (TM).

Se pueden discriminar dos grupos dentro del programa Landsat. Uno de ellos formado por los primeros 3 satélites que fueron lanzados en una órbita repetitiva y circular alrededor de la tierra a una altura nominal de 919 km, sincrónica con el sol y cerca de los polos. El satélite orbitaba la Tierra una vez cada 103 minutos completando 14 órbitas por día. Los Landsat 1, 2 y 3 fueron lanzados con dos sistemas de sensores idénticos a bordo: el sistema RBV y el MSS, sin embargo el primero estuvo plagado de problemas técnicos y dejó de funcionar.

El otro grupo de satélites conformado por los Landsat 4 y 5 tienen las mismas características que sus predecesores en cuanto a su órbita con la diferencia de que ahora vuelan a una altura de 705 km para hacer a los satélites potencialmente recuperables y también para ayudar a mejorar la resolución espacial de los sensores a bordo. Estos satélites cuentan con los sistemas MSS y TM. En la tabla IV.1 se listan los diferentes tipos de resolución de estos sistemas.

**Tabla IV.1 Resoluciones de los sistemas MSS y TM en los Landsat 4 y 5**

Sensor	Tipos de resolución			
	espectral ( $\mu\text{m}$ )	espacial (m)	temporal (días)	radiométrica (bits)
<b>MSS</b>				
banda 4	0.5-0.6	79 x 79	16	7
banda 5	0.6-0.7	79 x 79	16	7
banda 6	0.7-0.8	79 x 79	16	7
banda 7	0.8-1.1	79 x 79	16	6
<b>TM</b>				
banda 1	0.45-0.52	30 x 30	16	8
banda 2	0.52-0.60	30 x 30	16	8
banda 3	0.63-0.69	30 x 30	16	8
banda 4	0.76-0.90	30 x 30	16	8
banda 5	1.55-1.75	30 x 30	16	8
banda 6	10.40-12.5	120 x 120	16	8
banda 7	2.08-2.35	30 x 30	16	8

### **Sistema de Barrido Multiespectral (Multispectral Scanner - MSS)**

El sistema MSS fue el primer sistema de monitoreo global capaz de producir datos multiespectrales en un formato digital. Este sistema está instalado 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.-. El espejo explorador oscila a través de un desplazamiento angular que genera un haz de exploración de 11°. 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. El campo instantáneo de vista (IFOV) del sensor multiespectral es cuadrado con una resolución de 79 x 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 (6 bits). Estos datos son escalonados en procesos subsiguientes (de 64 a 128). El MSS explora cada línea de oeste a este con un movimiento hacia el sur del satélite que proporciona la progresión a lo largo de la línea explorada.

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

El sistema 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 multiespectrales con una mayor resolución espacial, espectral y radiométrica que las imágenes del sistema MSS. La creación del sistema TM fue resultado de varios años de análisis de los defectos que presentan los sistemas antecesores. Algunas de las utilidades de este sistema son la discriminación del tipo de vegetación, mediciones en la humedad del suelo, diferenciación de nubes y nieve e identificación de alteración hidrotermal en ciertos tipos de roca. En la tabla IV.2 se listan las siete bandas espectrales del TM, con un breve resumen de las principales aplicaciones de cada una.

La resolución espacial del sistema TM es mucho mejor que la del MSS. Cuenta con un campo instantáneo de vista (IFOV) de 30 x 30 m (para todas las bandas excepto para la banda térmica la cual tiene un IFOV de 120 m). Se han incorporado algunos cambios en el diseño del TM para mejorar la precisión del posicionamiento geodésico de datos.

**Tabla IV.2 Características de las bandas espectrales del Landsat TM.**

<i>Banda</i>	<i>Longitud de onda (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Localización espectral nominal</i>	<i>Principal aplicación</i>
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. También es útil para la identificación de rasgos culturales.
3	0.63-0.69	rojo	Diseñada para percibir una región de clorofila auxiliando en la diferencia de las especies de plantas, también es útil para la delineación 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, contenido de biomasa, para delinear cuerpos de agua y para la discriminación de humedad de 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 hidrológicas.
6*	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*	2.08	infrarrojo medio	Útil para la discriminación de minerales y tipos de rocas (particularmente efectiva en la identificación de zonas de alteración hidrotermal de rocas). También es sensible al contenido de humedad de la vegetación.

\* 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

## V. PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN

### V.1 Introducción.

El procesamiento digital de imágenes se realiza para poder manipular matemáticamente la información obtenida en cada una de las bandas del espectro electromagnético. El ojo humano es capaz de distinguir hasta 16 tonos de grises, sólo en el espectro visible, mientras que las imágenes digitales pueden ser grabadas en 256 tonos de gris y abarcan además del visible al infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo térmico. Otra de las cualidades del procesamiento digital es que se puede extraer una gran cantidad de información cuantitativa que puede ser estudiada por otro analista.

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

En la actualidad existe una gran variedad de equipos de computo y programas específicos para analizar imágenes de satélite, casi todos cuentan con módulos de preprocesamiento, de despliegue y realce, de extracción de información temática, además de un módulo para combinar información de las imágenes en un sistema de información geográfica (SIG).

### V.2 Método de Procesamiento.

El procesamiento de los datos de percepción remota fue limitado a una subimagen referida con el nombre de imagen La Primavera. El procesamiento fue realizado en una computadora *Digital Venturis 466* a 66 MHz con coprocesador matemático, monitor a color SuperVGA con resolución de 1024 x 768 con despliegue de 256 colores y en una Estación de Trabajo *Sun IPX* a 40 Mhz, monitor a color con resolución de 1024 x 1024. Se emplearon los paquetes de procesamiento de imágenes *IRISI* versión 4.1 por la "Graduate School of Geography" de la Universidad de Clark y el



**ERMAPPER 4.** 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 de procesamiento digital de imágenes se hizo tomando en cuenta los objetivos particulares del estudio.

El procesamiento digital de la imagen se inició con el despliegue en pantalla y el cálculo de las estadísticas de los datos de la imagen multiespectral sin procesar para tener una idea de la calidad de la misma. Con base en estas observaciones, la imagen fue preprocesada para reducir las distorsiones producidas por el medio ambiente y/o los dispositivos usados en su adquisición.

Una vez realizado el preprocesamiento se aplicaron a la imagen diversas técnicas de realce tanto espacial como espectral para análisis visual o para utilizarla como datos de entrada en otros procesos para la extracción de información temática.

### V.3 Análisis Estadístico

El análisis estadístico de las imágenes digitales incluye generalmente la obtención de las estadísticas univariadas (valor máximo y mínimo, la media y desviación estándar de cada una de las bandas que componen la imagen multiespectral. En la tabla V.1 se listan las estadísticas univariadas de la imagen La Primavera.

**Tabla V.1 Estadísticas Univariadas de las siete bandas de la imagen La Primavera**

No de banda	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
Máximo	238	142	188	149	255	177	255
Mínimo	43	13	10	6	7	118	2
Media	68.57	30.54	35.48	46.90	82.71	143	40.44
Des. Estándar	11.84	7.86	12.40	9.42	25.81	8.70	17.81

En el análisis de las estadísticas univariadas de la tabla V.1 se observa que las bandas TM1, TM2 y TM3 que representan al espectro visible contienen valores mínimos de brillantez

relativamente altos. Esto es debido a que en la región del visible del espectro electromagnético ocurre el efecto de la dispersión atmosférica mientras que en las bandas TM4, TM5 y TM7 los mínimos de brillantez son más bajos porque en esta región la dispersión es menor. Por otra parte las bandas TM5 y TM7 presentan una distribución de valores de brillantez que ocupa casi en su totalidad el rango disponible de valores (0-255). La banda térmica (TM6) no fue procesada debido a que tiene una resolución espacial distinta con respecto a las otras bandas.

Las estadísticas univariadas son útiles para medir la tendencia de los datos; sin embargo no proporcionan información acerca de 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 con la otra alrededor de una media común a ellas.

Para estimar el grado de correlación entre las bandas se usa el *coeficiente de correlación*, éste varía 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. El coeficiente cero indica que no hay ninguna correlación entre las bandas. En la tabla V.2 se muestran los valores de las estadísticas multivariados de las bandas no térmicas de la imagen La Primavera.

La matriz de varianza-covarianza muestra un valor bajo en la banda TM2, ésta tiene un contraste más bajo que las demás bandas en tanto que la banda TM5 presenta la varianza más alta debido a las diferencias de respuesta espectral entre los materiales que conforman la escena.

La matriz de correlación muestra la gran similitud que hay entre las bandas TM1, TM2 y TM3 del visible al igual que la TM7 con la TM3 y TM7 con TM5. La correlación más baja se presenta entre la TM7 y la TM4. La banda TM4 es característica de la vegetación en tanto que la banda TM7 es más apropiada para la separación de materiales geológicos. Es importante señalar que entre menos correlación tengan entre sí las bandas, mayor información se podrá obtener de ellas separando sus respuestas espectrales.

<b>Tabla V.2 Estadísticas multivariadas de las 6 bandas no térmicas de la imagen La Primavera</b>
---

<b>Matriz de Varianza-Covarianza</b>						
Var/cov	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	140.19					
TM2	91.55	61.81				
TM3	142.72	96.26	153.92			
TM4	80.89	57.89	88.75	88.90		
TM5	255.76	174.04	287.16	169.16	666.39	
TM7	185.68	124.83	205.06	109.20	446.90	317.24

<b>Matriz de Correlación</b>						
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	1					
TM2	0.98	1				
TM3	0.97	0.98	1			
TM4	0.72	0.78	0.75	1		
TM5	0.83	0.85	0.89	0.69	1	
TM7	0.88	0.89	0.92	0.65	0.97	1

### **Histogramas**

Las imágenes de percepción remota son una representación espacial en dos dimensiones de la interacción de la 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 disponible (0-255). El rango de valores de brillantez se presenta en las abscisas, mientras que la frecuencia de ocurrencia de cada uno de estos valores en la ordenada.

### **V.4 Preprocesamiento**

La adquisición de datos por los sistemas de percepción remota no siempre es perfecta, comúnmente se acarrean errores provocados por fenómenos atmosféricos, complejidad en el terreno, errores del mismo sensor, o por irregularidades de vuelo en altitud, posición, velocidad, curvatura

de la Tierra etc. Las correcciones más usadas en las imágenes son las *correcciones radiométricas y geométricas*.

Los efectos atmosféricos de absorción y dispersión son la fuente más común de errores radiométricos que afectan los valores 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.

Para corregir los errores radiométricos generalmente presentes en las imágenes de percepción remota, se analizaron visualmente las bandas de la imagen La Primavera y se utilizó la técnica de *ajuste del histograma* la cual consiste en sustraer la tendencia establecida para cada banda espectral. En la Tabla V.3 se presenta el ajuste para las 6 bandas no térmicas de La Primavera.

**Tabla V.3 Corrección de datos radiométricos para las 6 bandas no térmicas de la imagen La Primavera**

Banda original	Máximo	Mínimo	Banda corregida	Máximo	Mínimo
TM1	238	43	TM1	195	0
TM2	142	13	TM2	129	0
TM3	188	10	TM3	178	0
TM4	149	6	TM4	143	0
TM5	255	7	TM5	248	0
TM7	255	2	TM7	253	0

Las correcciones geométricas se realizan para georeferenciar la imagen y usarla como mapa, la técnica más común que se utiliza para este tipo de corrección es la triangulación de puntos de control en el terreno visualmente distinguibles en la imagen. Sin embargo 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 por lo que se omitió esta corrección para el presente trabajo.

## **V.5 Realce Digital.**

Las técnicas de realce consisten en aplicar operaciones 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.

Las técnicas de realce tanto espacial como espectral se usan directa o indirectamente para extraer información de las imágenes multispectrales para la solución de problemas específicos (Ruiz-Armenta, 1994). 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 a la imagen. El objetivo principal de aplicar las técnicas de realce a la imagen La Primavera es el de mapear áreas con alteración hidrotermal y estructuras geológicas a partir de la extracción de la información espectral y espacial contenida en la imagen.

### **V.5.1 Técnicas de realce espectral**

#### ***Composición de color.***

La técnica de composición de color convierte imágenes de 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 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 los colores básicos. En la composición de color de imágenes multispectrales, 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 específicos, cuya intensidad es proporcional a los valores de brillantez contenidos en la imagen. En la figura V.1 se muestra una composición en colores naturales de la imagen La Primavera. Las bandas de entrada de datos fueron la TM1 (azul), TM2 (verde) y TM3 (rojo).

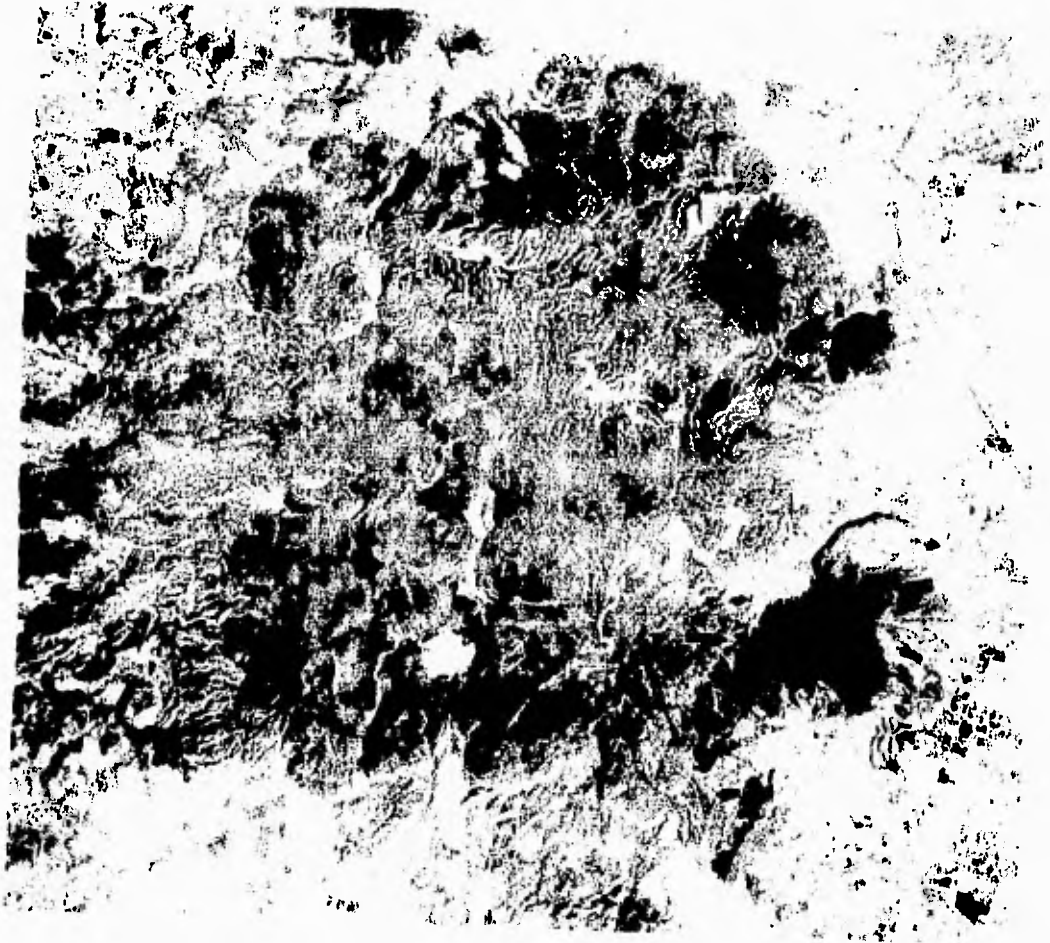


Figura V.1 Composición en colores naturales de la imagen I a Primavera.

FALLA DE ORIGEN

### ***Algebra de Bandas***

Algunas veces se usan simples operaciones aritméticas como la suma, sustracción, multiplicación y división de los valores de brillantez de dos bandas para formar una imagen, por ejemplo, la suma de bandas de una imagen es usada principalmente para fusionar información de dos imágenes.

### ***Cociente de bandas***

Los cocientes de bandas son realces 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 y por otro lado maximiza las diferencias espectrales sutiles que son enmascaradas por las variaciones de brillantez.

### ***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 multiespectral o multidimensional de los datos de las imágenes digitales hace posible la aplicación de las componentes principales para generar nuevos juegos de bandas o componentes. Estas componentes representan una descripción alternativa de los datos, en las que las nuevas componentes se relacionan a sus valores de brillantez originales. La imagen transformada puede hacer evidente algunos rasgos que no sean claros en los datos originales. Por medio de esta transformación los datos originales son redistribuidos en un nuevo juego de imágenes, reteniéndose la mayor cantidad de varianza en la primera componente y decreciendo en las componentes subsecuentes.

### V.5.2 Realce Espectral para el mapeo de alteración hidrotermal.

La alteración hidrotermal se genera por la interacción fluido geotérmico-roca, donde los fluidos geotérmicos que actúan convectivamente reaccionan con las rocas que los contienen. Por un lado estos fluidos disuelven y/o depositan algunos constituyentes como la sílice y por otro alteran los minerales primarios para dar lugar a los productos de neofonnación. Tales productos reflejan las condiciones de temperatura a través de las reacciones químicas que se llevan a cabo durante este proceso (Henley, 1984). Los efectos de estas reacciones son llamados *alteración de la roca encajonante* y el volumen que ésta ocupa zona de *alteracion*. En la parte superficial de un sistema hidrotermal activo, como es el caso de La Primavera, se tienen principalmente hidroxilos como minerales de alteración.

Actualmente el mapeo de alteración es posible con sensores que puedan detectar la presencia de grupos característicos de las zonas de alteración con base en los rasgos espectrales de los mismos en la parte del visible y del infrarrojo cercano (0.4-1.1 $\mu$ m) del espectro electromagnético (Hunt, 1977). Dispositivos tales como el Thematic Mapper pueden discriminar entre diferentes litologías y mapear la distribución de diferentes grupos de minerales como los hidroxilos, los óxidos, etc.

Algunos minerales característicos en la alteración hidrotermal (como la sericita, biotita, siderita, montmorillonita, caolinita, calcita, pirofilita y anhidrita) producen rasgos espectrales característicos. Estos rasgos nos proporcionan bases físicas para el mapeo de zonas alteradas.

La región de La Primavera está constituida en su mayor parte de rocas ígneas extrusivas de composición riolítica y en algunas localidades estas rocas han sido alteradas por fluidos hidrotermales. La alteración se indica frecuentemente por la presencia de minerales arcillosos. Los afloramientos de roca constituyen la menor proporción de la superficie observable, la mayor parte consiste en vegetación (principalmente coníferas de clima templado) que cubre el área aproximadamente en un 70%. La problemática del mapeo consiste en separar la respuesta espectral de la vegetación que "enmascara" la respuesta que dan los hidroxilos. En la figura V.2 se muestran



las curvas espectrales de estos materiales para determinar las bandas donde tienen una respuesta característica.

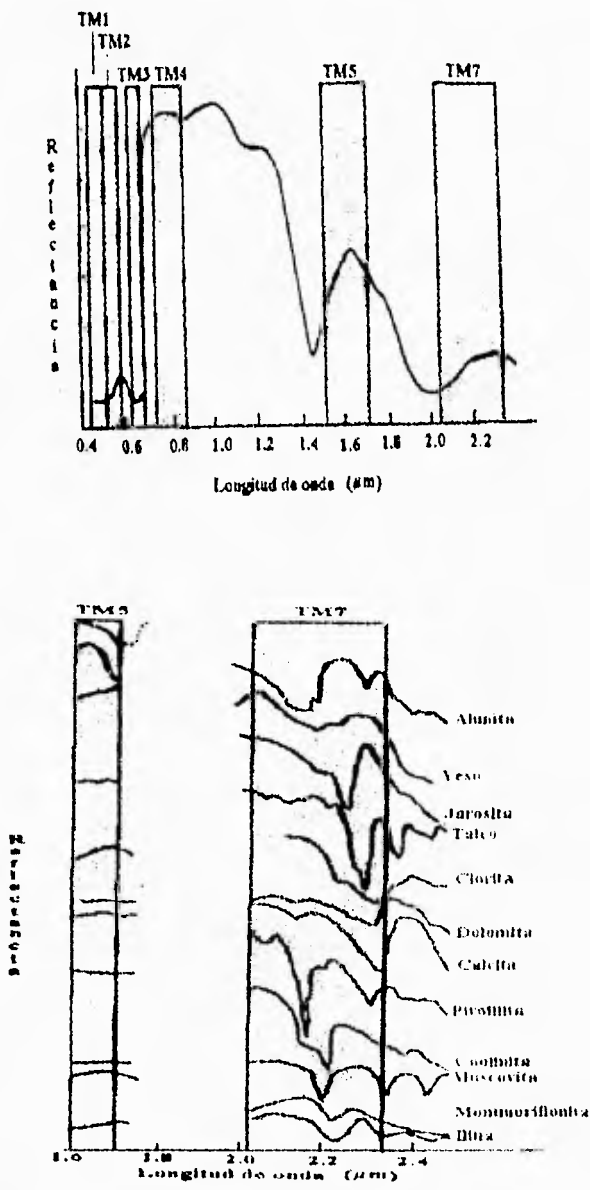


Figura V.2 Curvas de reflectancia espectral de la vegetación y de los hidroxilos.

Del análisis visual de la figura V.2 se observa que los hidroxilos presentan altos valores de reflectancia alrededor de 1.65  $\mu\text{m}$  y fuertes rasgos de absorción alrededor de 2.2  $\mu\text{m}$ , mientras que la vegetación presenta rasgos de reflectancia en el infrarrojo cercano y rasgos de absorción entre 0.45 y 0.68  $\mu\text{m}$ . La tabla V.4 resume las características espectrales de los hidroxilos y la vegetación relacionadas a las bandas del sistema TM.

**Tabla V.4 Características espectrales de los hidroxilos y la vegetación (Modificada de Ruiz Armenta, 1994)**

Materiales	Reflectancia	Absorción
Materiales arcillosos, carbonatos, filosilicatos y sulfatos	TM5*	TM7*
Vegetación	TM4*	TM3
	TM2	TM1
	TM5	
	TM5	

\* Bandas con los rasgos espectrales más característicos

Los cocientes de bandas del sistema TM son relativamente fáciles de interpretar. Se aplicó esta técnica en las bandas TM5/TM7 (figura V.3) para representar en *pixels* brillantes a los hidroxilos. En el cociente TM4/TM3 (figura V.4) se obtiene la vegetación también en *pixels* brillantes y por último se hizo el cociente TM3/TM1 para la representación de óxidos.

Los resultados de los cocientes de bandas analizados en forma independiente no arrojaron buenos resultados por lo que se hizo una composición a color para separar visualmente la respuesta de los hidroxilos y la vegetación. En La figura V.5 se presenta la composición a color de las imágenes TM5/TM7 (rojo), TM3/TM1 (azul) y TM4/TM3 (verde). En esta imagen se observa la vegetación en color verde, sin embargo el color rojo de los hidroxilos se combina con el azul de los óxidos creando un color intermedio que produce resultados confusos. Aplicando la técnica de Crosta se obtuvieron resultados más confiables.

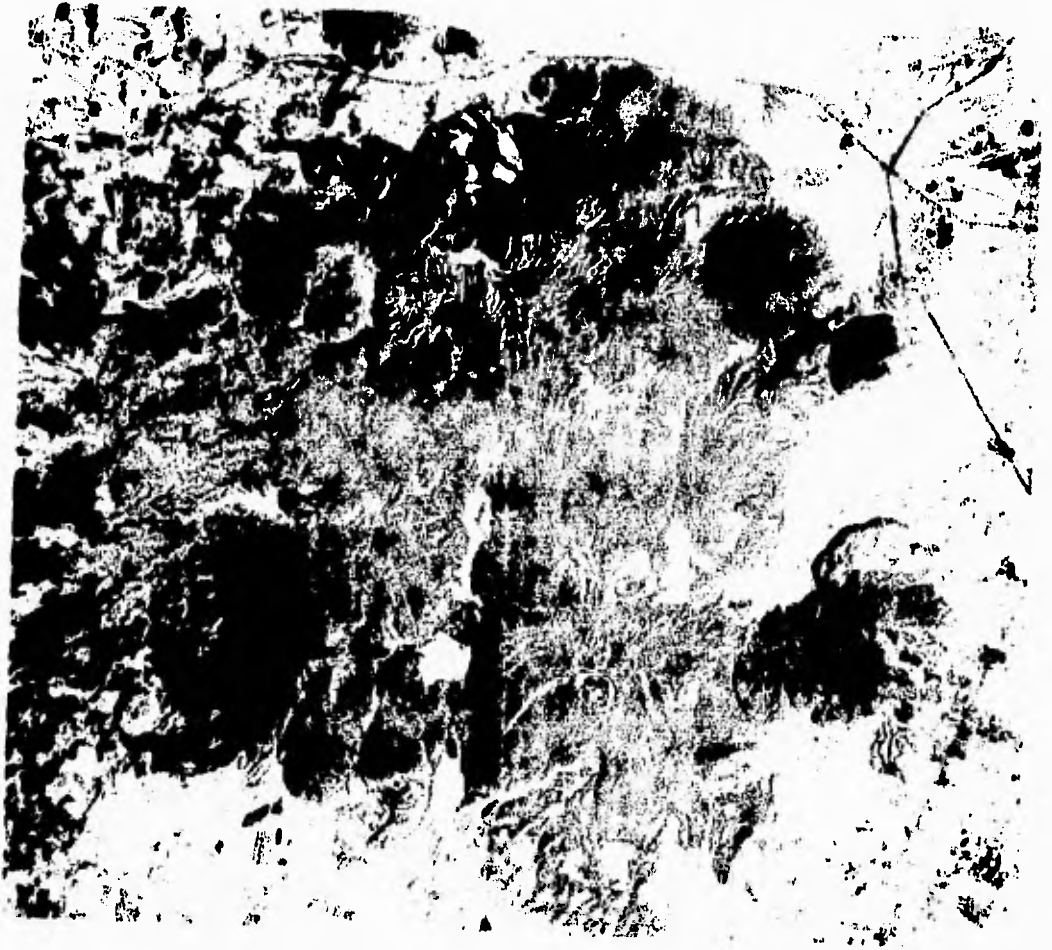


Figura V.3 Cociente de bandas TM5/TM7 de la imagen La Primavera.

FALLA DE ORIGEN



Figura V.4. Cociente de bandas TM1/TM3 de la imagen 1 - Primavera

FALLA DE ORIGEN



Figura V.5 Composicion a color de los coeientes TM5/TM7, TM7/TM3,  
TM3/TM1 de la imagen La Primavera.

FALLA DE ORIGEN

### ***Técnica de Crosta con seis bandas para el mapeo de hidroxilos***

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 su 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.

La tabla V.5 presenta la transformación de componentes principales usando la matriz de covarianza de las bandas no térmicas de la imagen La Primavera.

**Tabla V.5 Transformación de Componentes Principales de las 6 bandas no térmicas de la imagen La Primavera.**

<b>Componente</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>	<b>CP5</b>	<b>CP7</b>
<b>% Varianza</b>	91.98	4.76	2.56	0.44	0.21	0.04
<b>Banda / Valor característico</b>						
TM1	29.74	49.61	-36.62	-18.77	-65.50	-25.86
TM2	20.20	32.71	-13.08	-8.36	7.86	90.65
TM3	32.77	37.96	-23.03	-18.29	74.58	-32.49
TM4	19.27	48.55	79.54	29.49	-4.53	-7.22
TM5	70.12	-17.42	28.16	-44.41	-7.93	2.13
TM7	48.41	-20.48	-28.92	80.00	-0.22	-0.16

Al observar los valores de signo y magnitud 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 con una contribución mayor de la banda TM5 (70.12 %). Esta componente fue usada en procesos posteriores de realce espacial debido a que contiene la información topográfica de las seis bandas además de tener el 91.98% de la varianza. La componente CP2 no contiene una contribución importante de las bandas con rasgos espectrales característicos de los minerales buscados, por lo tanto no contribuye con información relevante al análisis. En la componente CP3 se observa un valor alto de la contribución de la banda TM4 (79.54 %) que es característica de la vegetación, y por tener signo positivo, esta se presenta en *pixels* brillantes. En la componente CP4 se tiene una contribución alta y positiva de la banda TM7 (80.00 %) donde es característica la absorción de los hidroxilos y negativa en la banda TM5 (44.41 %) donde tienen una reflectancia alta por lo que se presentan en *pixels* oscuros. Las componentes CP5 y CP6 contienen información acerca de óxidos de hierro que interfieren en el mapeo de hidroxilos en la composición a color de los cocientes de bandas.

De lo anterior se resume que la componente CP1 contiene la información topográfica de las 6 bandas; la componente CP3 (figura V.7) mapea en *pixels* brillantes a la vegetación; la componente CP4 (figura V.8) mapea en *pixels* oscuros a los hidroxilos y los óxidos de hierro son separados en las componentes CP5 y CP6.

Al correlacionar visualmente la información las imágenes de las figuras V.7 y V.8 se tiene que la vegetación de la sierra la Primavera es separada eficazmente. El mapeo de hidroxilos muestra zonas con alto potencial geotérmico, ésto se confirma al mapear zonas de alteración que coinciden con localidades donde actualmente se tienen pozos exploratorios y de producción desarrollados por CFE como es el caso de Río Caliente y el Domo Nejahuete, así como Cerritos Colorados. Otra zona donde se tiene mapeo de hidroxilos coincide con las fumarolas localizadas en los Cerros Las Planillas.

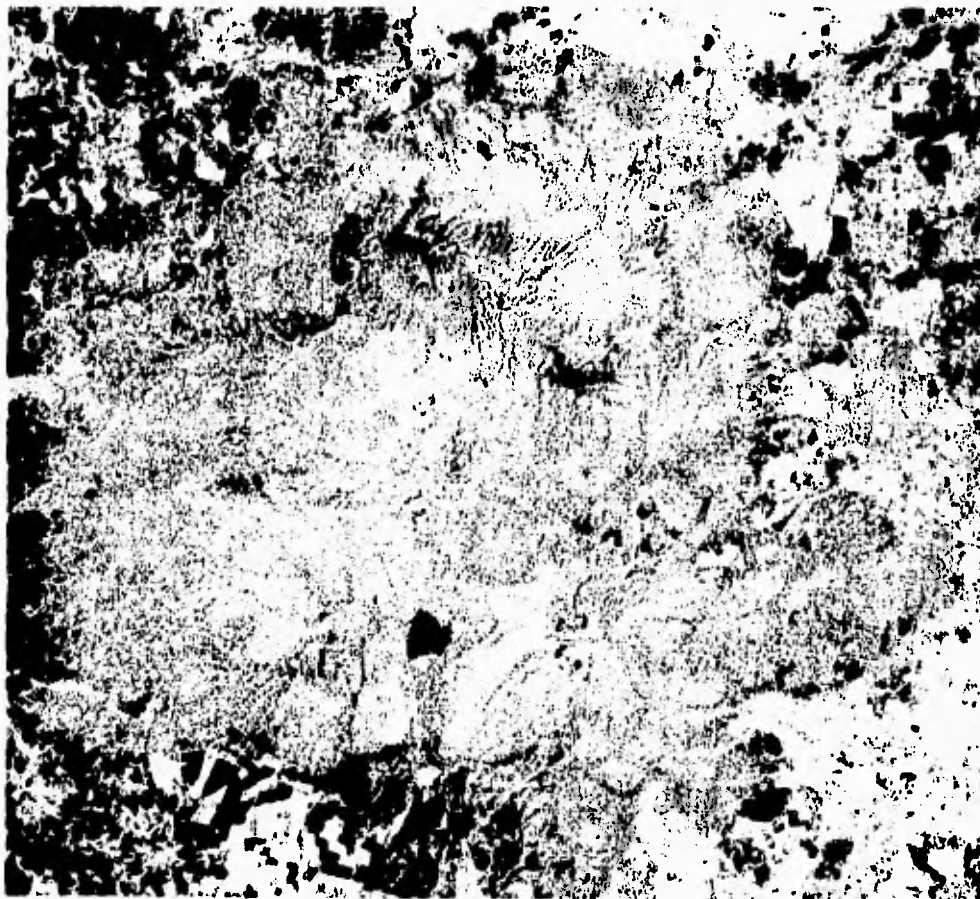
En la Sierra de La Primavera y cerca de ella se tienen muchos bancos de materiales de construcción propiciados por la cercanía de la ciudad de Guadalajara, esto hace que algunas localidades sean mapeadas como hidroxilos y que en realidad sean bancos de materiales donde la roca aflorante se altera rápidamente al no tener cubierta de vegetación.



Figura V.6 Componente Principal 3 de la imagen La Primavera  
Mapeo de vegetación en píxels brillantes

FALLA DE ORIGEN





**Figura V.7** Componente Principal 4 de la imagen La Primavera  
Mapeo de hidroxilos en pixels oscuros.

FALLA DE ORIGEN

### V.5.3 Técnicas realce espacial

Las imágenes de satélite cuentan con un parámetro llamado *frecuencia espacial* y se define como el número de cambios en los valores de brillantez por unidad de distancia para una región particular de la imagen. Si se tienen cambios abruptos en los valores de brillantez en distancias cortas, la región es referida como de *alta frecuencia*. A la inversa, una región de *baja frecuencia* es asociada a cambios graduales en los valores de brillantez. Estos cambios pueden ser procesados para producir diferentes realces. El proceso para extraer información 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 técnica muy empleada para hacer realces espaciales en las imágenes Landsat TM es el filtrado por medio del proceso de *Convolución*. 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 sobre la imagen original y el valor de brillantez del centro del kernel en una segunda imagen de salida se obtiene multiplicando cada coeficiente del kernel por el correspondiente valor de brillantez en la imagen original y sumando todos los productos resultantes.

#### *Filtros de Suavizado y Realce*

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 la imagen.

El filtro de suavizado (*pasa-bajas*) más usado es un promedio de los valores de brillantez de los *pixels* de la imagen contenidos dentro de la vecindad, el tamaño de la vecindad es usualmente 3 x 3, esta técnica de filtrado es conocida como *filtro del valor medio*. El filtro de realce de bordes consta de otra matriz de 3 x 3 donde al valor central se le da mayor peso que a los *pixels* vecinos aplicando una multiplicación.

#### *Gradientes Direccionales*

Pratt (1978) implementó un medio para realzar los bordes dentro de una imagen con una orientación particular haciendo uso de la diferenciación discreta bidimensional a partir de matrices cuadradas. 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). El nombre de las ventanas sugieren la dirección máxima de pendiente. Por ejemplo, la ventana del gradiente oeste (W) produce el valor máximo de salida para los cambios de brillantez horizontales de derecha a izquierda; sin embargo los lineamientos que se realzan tienen una dirección perpendicular, es decir, N-S debido a efectos de iluminación.

En la tabla V.6 se presenta un filtro de realce de bordes no direccional y los gradientes direccionales de Prewitt

Tabla V.6 Filtros direccionales de Prewitt y no direccionales

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad NE = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad NW = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$SE = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad SW = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad NoDireccional = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

#### **V.5.4 Realce espacial para el mapeo de lineamientos.**

El mapeo de estructuras geológicas regionales puede realizarse mediante el procesamiento de imágenes Landsat. Las fracturas y fallas en las rocas comúnmente se presentan como bordes o segmentos de líneas que forman "lineamientos" en las imágenes de satélite. Un lineamiento se define 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" (O'Leary, 1976). Estos lineamientos pueden estar formados por una variedad de elementos del paisaje, incluyendo la topografía, drenaje, vegetación y alineamientos de tonos del suelo. Algunos son continuos y muchos otros parecen ser continuos debido a que los espacios entre los bordes y segmentos de líneas son muy pequeños y por lo tanto son mezclados por el ojo humano; sin embargo, numerosos análisis muestran que casi todos los lineamientos son discontinuos.

El realce espacial de la imagen La Primavera se hizo a partir del procesamiento de la componente CPI que, como se citó anteriormente, tiene el 91.98 % de la varianza, y por lo tanto contiene información topográfica de las 6 bandas no térmicas. Se utilizó el método desarrollado por Moore y Waltz (1983) que consiste en cinco pasos:

- 1) Aplicar un filtro de pasa bajas para remover las altas frecuencias (ruido).
  
- 2) Usar algoritmos de convolución para derivar los componentes direccionales. En este paso se incrementa el contraste de bordes y de los segmentos de líneas que tienen una tendencia deseada.
  
- 3) Aplicar otro filtro de pasa-bajas en la imagen de la componente direccional para reducir el efecto secundario de creación de lineamientos artificiales (*artefactos*) en la dirección del filtro.
  
- 4) Reescalar la imagen dentro de un rango de 0 a 255 para poder desplegar la imagen resultante.

5) Sumar la componente direccional procesada a la imagen original.

A pesar de que La Primavera se encuentra cerca de una zona donde convergen tres sistemas estructurales muy importante con direcciones E-W (graben de Chapala), N-S (graben de Colima) y NW-SE (graben de Tepic), el fracturamiento está controlado principalmente por las etapas de máxima deformación del ciclo caldérico. Los filtros de Prewitt (ver tabla V.5) fueron aplicados en todas direcciones para mapear los lineamientos radiales y circulares de la caldera; sin embargo, se obtuvieron mejores resultados de los filtros NE-SW y NW-SW. El filtro de realce de bordes no direccional también proporcionó información importante.

El filtro de suavizado (pasa-bajas) fue aplicado a la componente principal I de la imagen La Primavera (figura V.9). El fenómeno "sal y pimienta" fue removido observándose con mayor nitidez la topografía.

La figura V.10 muestra el filtro de realce de bordes. En la imagen resultante se alcanza a observar la estructura caldérica. Los escarpes que forman los domos riolíticos del arco sur son resultados. También se aprecia claramente el patrón radial de drenaje controlado estructuralmente por los domos, así como el drenaje dendrítico en la parte izquierda de la imagen donde aflora en su mayor parte la Toba Tala. Por otra parte se observan muy bien los escarpes correspondientes a las fallas Anillo Caldérico, Río Caliente y Mesa El Nejahuete al igual que algunos lineamientos radiales.

En la figura V.11 se presenta el cuadrante NE de la imagen la Primavera filtrada en la dirección NE-SW en la cual se observa nitidamente un lineamiento con *pixels* oscuros correspondiente a la Falla La Gotera. Su traza se observa desde la población La Gotera hasta el Cerro del Colli con una dirección NW-SE. Esta falla ha sido inferida por algunos autores y omitida por otros (ver sección III.4).

Las fallas Anillo Caldérico, Río Caliente y una porción de la Falla Mesa El Nejahuete fueron también mapeadas en el filtro direccional NW-SE (figura V.12), además se observan lineamientos entre los domos Pinar de la Venta, Arroyo La Cuatilla y Mesa La Lobera.

***Iluminación Artificial.***

Esta técnica consiste en simular el movimiento de un foco luminoso sobre una imagen en tiempo real con el propósito de observar cambios en las sombras y poder apreciar más fácilmente los escarpes de fallas y lineamientos. También se pueden observar en forma general diferentes tipos de estructuras.

La Técnica de iluminación artificial fue aplicada en la componente CPI de la imagen La Primavera. Los mejores resultados se obtuvieron con focos de iluminación ubicados a elevaciones entre 50° y 60° y con un azimut de 329°. Se alcanza a observar la estructura caldérica por el lineamiento circular de los domos que aparecen en *pixels* oscuros.



Figura V.8 Filtro pasa-bajas en la CPI de la imagen La Primavera

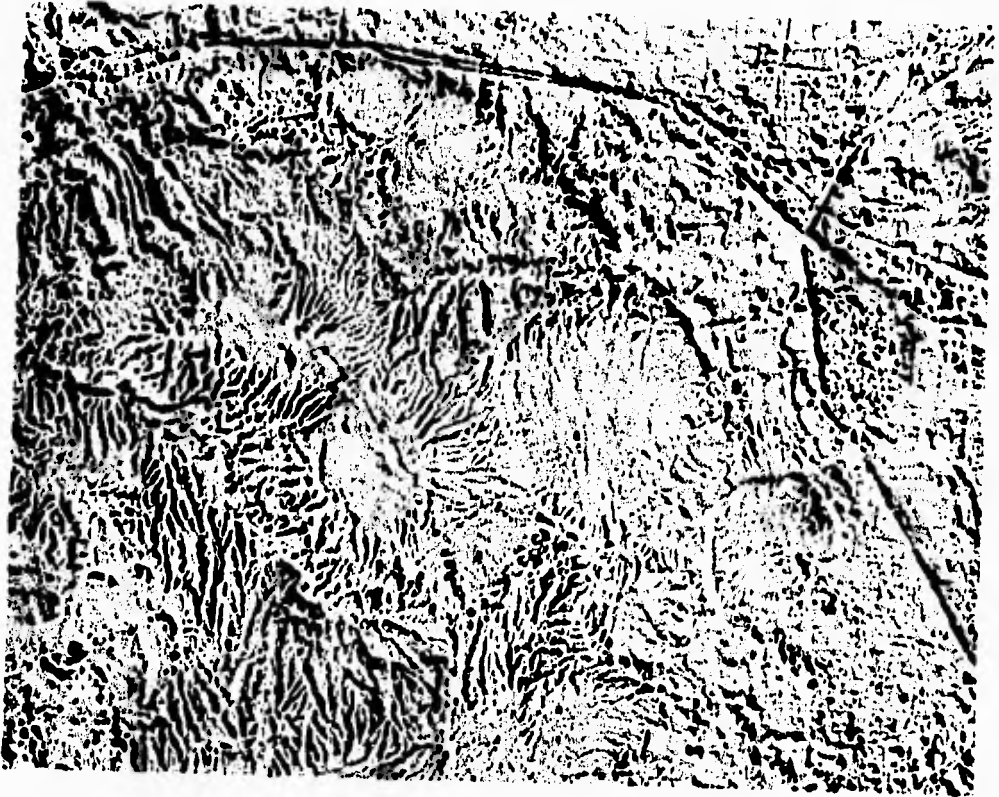
FALLA DE ORIGEN



**Figura V.9** Filtro de realce de bordes no direccional de la imagen La Primavera Cerro El Pedernal (A); Domo Mesa El Nejahuete (B) y Domo Cerro El Chapulín (C).

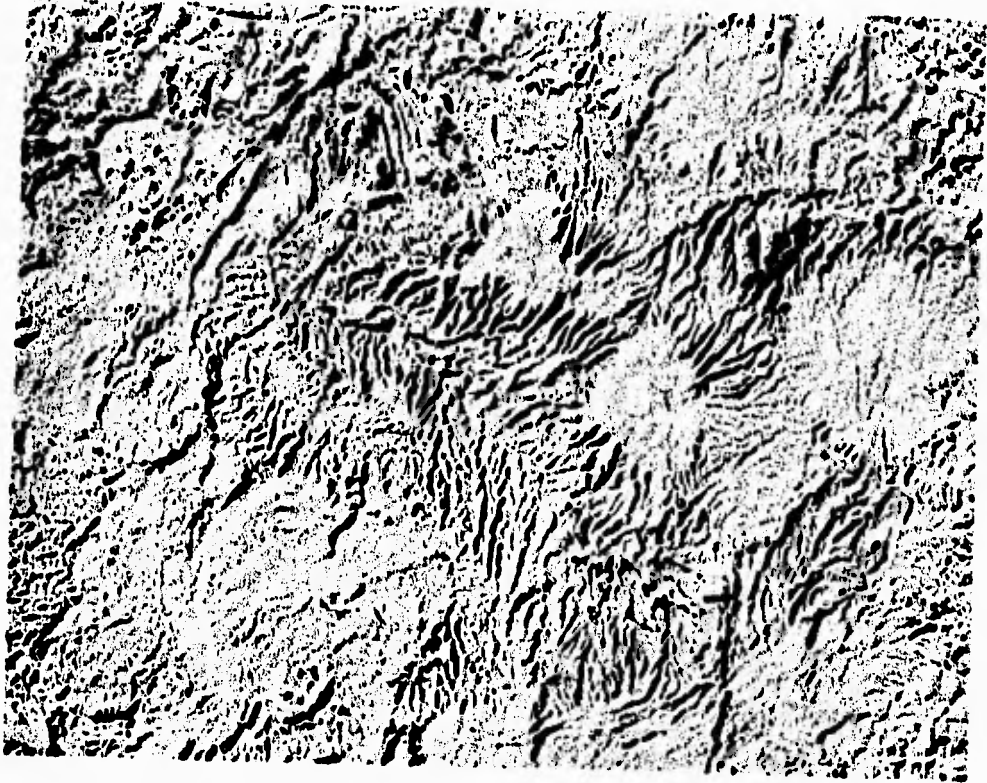
FALLA DE ORIGEN





**Figura V.10** Cuadrante NE de la imagen La Primavera con filtro direccional NE-SW  
Cerro El Pederanal (A) y Domo Mesa El Nejalhuete (B).

FALLA DE ORIGEN



**Figura V.11** Filtro direccional NW-SE:  
Cerro El Chapulín (A) y Domo Mesa El Nejalhuete (B).

## CONCLUSIONES

Las técnicas de procesamiento de imágenes desarrolladas en la exploración minera se pueden adaptar perfectamente con fines de exploración geotérmica. El mapeo de hidroxilos indica la presencia de áreas con manifestaciones superficiales propias de un sistema hidrotermal activo, en tanto que el mapeo de lineamientos puede indicar zonas de debilidad donde la generación de permeabilidad secundaria por la presencia de fracturas y fallas favorece la circulación de fluidos geotérmicos. Al combinar la información espectral de las zonas de alteración con la información espacial de los lineamientos se delimitan áreas de mayor potencial geotérmico.

La separación de la respuesta espectral de la vegetación y de los minerales característicos de alteración hidrotermal superficial (hidroxilos) fue posible aplicando distintas técnicas como la composición a color y los cocientes de bandas; sin embargo, el mejor resultado fue obtenido utilizando la técnica de Crosta para las seis bandas no térmicas. En dicha técnica se generó un nuevo juego de bandas o componentes que representan una nueva alternativa de datos. En la componente CP4 fue separada la respuesta espectral de los hidroxilos. El mapeo de éstos coincide con la localización de fumarolas en los Cerros Las Planillas y con áreas donde actualmente se tienen pozos geotérmicos.

El realce espacial indica lineamientos que no necesariamente corresponden a fallas, pero pueden proporcionar información acerca de la tendencia estructural en la Sierra de La Primavera. Con la combinación de filtros y la técnica de iluminación artificial se realizaron favorablemente estructuras que habían sido inferidas como la falla La Gotera y la misma estructura caldérica.

Al aplicar los filtros de Prewitt en todas las direcciones se pudieron mapear lineamientos radiales y circulares característicos de calderas. Los filtros en dirección NW-SE y NE-SW arrojaron mejores resultados que los filtros N-S y E-W. Con el filtro de realce de bordes no direccional, además de poder mapear lineamientos radiales, se pudo apreciar claramente el patrón de drenaje radial y dendrítico controlado por las estructuras dómicas en el interior de la caldera.

La verificación de campo es importante para determinar si los materiales mapeados como hidroxilos en verdad lo sean, o si se trata de materiales con una respuesta espectral similar. También es importante verificar los lineamientos ya que éstos pueden representar fallas y fracturas o pueden corresponder a lineamientos de vegetación, drenaje o alineamientos de tonos de suelo.

El procesamiento de imágenes Landsat Thematic Mapper es un medio rápido y efectivo para la identificación y delineación de zonas con posibilidades geotérmicas. Consecuentemente representa un ahorro de tiempo y de recursos económicos y humanos.

Los resultados del procesamiento de imágenes por si solos no resuelven el problema de localizar puntualmente yacimientos geotérmicos, es recomendable correlacionar estos resultados con información geológica, geofísica y geoquímica en sistemas de información geográfica, para poder hacer una exploración integral que redunde en evaluaciones de factibilidad más eficientes y fidedignas.

## BIBLIOGRAFIA

- Alatorre, M. A., Campos, O. E.,** La Primavera Caldera (Mexico): Structure inferred from gravity and hydrogeological considerations: *Geofísica Internacional*, Vol. 31, pp. 371-382, (1992).
- Atwater, M. J.,** Implication of Plate Tectonic for the Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America: *Geol. Soc. America Bull.*, Vol. 81, pp 3513-3536, (1977).
- Buntebarth, G.,** Geotermia, Introducción a los aspectos aplicados y teóricos de la conducción de calor en la Tierra: CONACYT, (1994).
- Cerriteño, O.,** Características Hidrodinámicas del Acuífero Somero de La Primavera: Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE, Informe 12/91, (1991).
- Crosta, A. P., McM Moore, J.,** Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residue Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a Prospecting Case History in Grenstone Belt Terrain: *Proceedings of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, Colorado Springs, ERIM pp. 1117-1187, (1989).
- Colwell, R. N.,** Manual of Remote Sensing: American Society of Photogrammetry, Vol 2, 2417 pp, (1983).
- Demant, A.,** Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Rev. Inst. de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, Vol. 2, No 2, (1978).
- Drury, S. A.,** A Guide to Remote Sensing, Interpreting Images of the Earth: Oxford Science Publications, Oxford University Press, 199 pp, (1990).
- Gutierrez-Negrin, L.C.A.,** The la primavera, Jalisco, México, Geothermal Field: *Geothermal Resources Council*, Vol. 12, pp 161-164, (1988).
- Gutierrez-Negrin, L.C.A.,** Resultados y perspectivas de la Geotermia en México: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, Comisión Federal de Electricidad, Vol. 11, No 1, pp 3-17, (1995).
- Henley, R. N., Truesdell, A. H., Barton, P. B. Jr.,** Fluid Mineral Equilibrio in Hydrothermal Systems. Serie Editor: James M. Robertson *Society of Economic Geologist*, pp 1-28, (1984).
- Hunt, G. R. y Ashe, R.P.,** Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared: *Economic Geology*, Vol 74, pp 1613-1629, (1979).
- Hunt, G. R.,** Spectra Signatures of Particulate Minerals in the Visible and Near Infrared: *Geophysics*, Vol 42, No 3, pp 501-513, (1977).
- Jensen, J. R.,** Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, Prentice-Hall, 379 pp, (1986).

- JICA.** Evaluación del Yacimiento Geotérmico en La Primavera: Gerencia de Proyectos geotermoelectrónicos, CFE, Informe Interno, (1989).
- López-Hernández, A.,** Análisis estructural y aportes al conocimiento volcánico en la Sierra de La Primavera, Jal.: Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, 80 pp, (1991).
- López Ramos, E.,** Geología de México, Tomo II, tercera edición, (1985).
- Mahood, G. A.,** Geological Evolution of a Pleistocene rhyolitic center Sierra La Primavera, Jalisco: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol 8, pp 199-230, (1980).
- Mahood, G. A.,** A summary of the geology and petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol 86, pp10137-10152, (1981).
- Mahood, G. A., Truesdell, A. H., Templos, L. A.,** A Reconnaissance Geochemical Study of La Primavera Geothermal Area, Jalisco, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 16, pp 247-261, (1982).
- Nash, G. D., Wright, P. M.,** The Use of Simple GIS Techniques to Create Improved Hydrothermal Alteration Maps From TM Data, Steamboat Springs and Virginia City Quadrangles, Nevada, USA: *Geologic Remote Sensing*, San Antonio, Texas, USA Vol. II, pp 132-141, (1994).
- Prol-Ledesma, R. M., Alcántara, A., Chavez, M.,** Exploración geotérmica utilizando imágenes de satélite en Los Humeros, Puebla, México: *Geofísica Internacional*, Vol. 32, Num. 1, pp 99-109, (1993).
- Razo, A., Pasquare, G., García, S., Nieva, D.,** Guía para estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmica: Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), (1992).
- Ramírez, G. S.,** Estudio Hidrogeológico de la Caldera de La Primavera, Jal.: Gerencia de Proyectos Geotermoelectrónicos, CFE, Informe 12/88, (1988).
- Robles-Hernández, J.,** Geología y Alteración Hidrotermal del Módulo Maritimo, Zona norte del Campo Geotérmico de los Azufres, Mich.:Tesis de licenciatura IPN, (1984).
- Ruiz-Armenta, J. R.,** Detección de Alteración Hidrotermal y Realce Estructural usando Imágenes Landsat Thematic Mapper: Su Aplicación en la Industria Minera: Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. 143 pp., (1994).
- Richards, John A.,** Remote Sensing Digital, Image Analysis, An Introduction: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 281 pp., (1986).
- Swain, P. H. y Davis, S. M.,** Remote Sensing: The Quantitative Approach:Mc Graw Hill Book Company, New York., (1978).
- Tello, H. E., Villa, M. S.,** Geoquímica de los Manantiales de Río Caliente, Jal.:Gerencia de Proyectos Geotermoelectrónicos, CFE. Informe 1/91 (1991).

**Torres, R. V., Arellano, G., Barragán, R. M., González, P. E.,** Geotermia en México: Programa Universitario de Energía, Coordinación de Investigación Científica, UNAM, 166 pp. (1993).

**Venegas, S., Maciel, R.,** Recursos Geotérmicos en la Faja Volcánica Mexicana: Geofísica Internacional, Special volume on the Mexican Volcanic Belt, Vol. 24, pp 47-81. (1985).

**Watson, K., Regan, R. D.,** Remote Sensing: Society of Exploration Geophysicists, Geophysics reprint series No. 3 (1983).

**Walker, G.P.L., Wright, J.V., Clought, B.J.,** Pyroclastic geology of the rhyolitic volcano of La Primavera, Mexico: Geol. Blundsch., 70,pp 1100-1118. (1981).

**Yokoyama, Y., Mens, M.,** Structure of La Primavera caldera, Jalisco, Mexico, deduced from gravity anomalies and drilling results: Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 47 pp 183-193, (1991).

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA