



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS GEOESTADISTICO DE METALES Y  
ELEMENTOS TRAZA PARA DETERMINAR  
PATRONES DE DEPOSITACION EN LAS ROCAS  
DEL CAMPO GEOTERMICO DE LA PRIMAVERA,  
MEXICO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A :

EDGAR ALCALA MONTIEL



MEXICO, D. F.

284331

2000



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  
AVÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-014

SR. EDGAR ALCALÁ MONTIEL  
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:

**ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE METALES Y ELEMENTOS TRAZA PARA DETERMINAR PATRONES DE DEPOSITACIÓN EN LAS ROCAS DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LA PRIMAVERA, MÉXICO**

- I INTRODUCCIÓN
  - II GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO
  - III METODOLOGÍA, ANÁLISIS QUÍMICO Y PETROGRÁFICO
  - IV CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS Y PETROGRÁFICAS DE LAS ROCAS DEL YACIMIENTO
  - V ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO
  - VI CONCLUSIONES
- GLOSARIO  
REFERENCIAS  
MAPAS E ILUSTRACIONES

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.

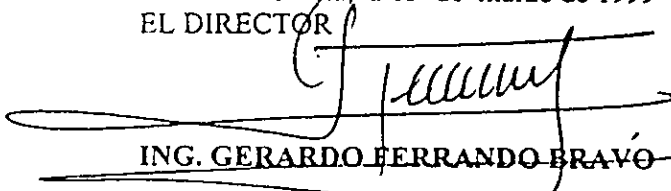
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cd. Universitaria, a 15 de marzo de 1999

EL DIRECTOR

  
ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg



**ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE METALES Y  
ELEMENTOS TRAZA PARA DETERMINAR  
PATRONES DE DEPOSITACIÓN EN LAS  
ROCAS DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LA  
PRIMAVERA, MÉXICO.**

Edgar Alcalá Montiel.

## Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi madre, la señora Irene Montiel Mendoza quien no tiene todas las respuestas, solamente las importantes...

A mi padre el Sr. Adrián Alcalá Martínez

A mi abuelita la Sra. Modesta Mendoza Hernández.

A mis hermanos en orden de aparición: Adrián, Iván, Ana Karina, José Luis, Sugey, y Alan Ramses Alcalá Montiel.

A Verónica Alejandra Cruz Casas, por que este mundo es mas interesante si ella está en el.

## Agradecimientos

No hay quien escriba solo, una tesis, y me gustaría robar un momento al lector para agradecer a algunas personas que me ayudaron en la elaboración de este trabajo:

A la Dra. Rosa María Prol Ledesma, del Instituto de Geofísica de la UNAM, por sus sugerencias prácticas y su estímulo.

A los Sres.:

Ing. Jorge Nieto Obregón  
M en C. Gilberto Silva Romo  
Ing. José Luis Jiménez Mendoza  
Dr. Ignacio Torres Alvarado  
Quim. Rufino Lozano Santa Cruz

Todos ellos reconocidos miembros de esa excelsa rama de la ciencia que es la Geología.

Naturalmente a Verónica Alejandra Cruz Casas, gracias por todo su cariño en estos años y sus críticas, tan severas e inflexibles como siempre.

A la Comunidad Europea contrato C11\*-CT94-0075 por el apoyo económico para poder realizar este trabajo.

A mis compañeros del instituto de Geofísica:

Ing. Mercedes Morales Alvarado  
Ing. Guillermo Almaguer García  
Ing. Gaudencio Galicia  
Ing. Sergio Hernández

Ing. Lissete Lopez Iglesias  
Marco Antonio Sandoval Miranda  
Ing. Sergio Yussim Guarneros  
M en C Faustino Juárez Sánchez

A mis compañeros(as) de la Facultad de Ingeniería, que son todos y cada uno de ellos, como las piezas, de una gran historia:

Pilar Magaña García  
Cereza Domínguez  
Pilar Guerrero  
Ing. Juan Carlos Velasco  
Diego Gonzalo  
Miguel Nolasco  
Santiago y Angélica (Aguilar)  
Miguel Angel Salazar  
Miguel Angel Orozco  
Ernesto Cuesta  
Martín Trápala  
Claudia Mireles  
y todos los que me faltaron...

Angélica Salas Martín  
Lilia Arana  
Rufino Sánchez Acevedo  
Alfredo Franco  
Felix (El gato)  
Gloria y Raúl Muñoz del Angel  
Hugo Castellanos  
Antonio Belmont  
Alberto Palomo  
Marco Cabrera  
Raúl Loyo  
Noe Santillán

A mis inolvidables amigos del CCH Naucalpan:

Marcos González Alvarado  
Angel Perez Rojas  
Carmen Urzúa Hernández  
Saúl Luna  
Beatriz Ramírez  
Adolfo Flores  
Rosa Isela Botello (†)... donde quiera que estés

Raúl López Morin  
Hermilo Aguilar Hernández  
Miguel Angel Meraz (Micky)  
Hugo Galán  
Luis Manuel Sánchez (Pichi)  
Guadalupe Toral

Al Sr Fernando Hevia Reyes, Herve Arce Pantoja, Leonardo González Domínguez y a todo el personal del Restaurante "*El Correo Español*"

## ÍNDICE

Indice.....	1
Resumen .....	3
<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
Depósitos epitermales.....	6
Sistemas hidrotermales dominados por vapor.....	7
Sistemas hidrotermales dominados por líquido.....	8
Sistemas magmáticos.....	8
Sistemas geopresurizados.....	8
Sistemas de roca seca caliente.....	9
Sistemas de rift.....	9
<b>CAPITULO II: GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>11</b>
Localización y acceso.....	11
Geología.....	14
Basamento .....	16
Vulcanitas cordilleranas .....	16
Lavas precaldera .....	16
Erupción ignimbrítica (Toba Tala).....	16
Colapso de la caldera .....	17
Sedimentación lacustre.....	17
Domos anulares antiguos (domos centrales).....	18
Domos anulares más jóvenes .....	19
Levantamiento .....	19
Lavas de arco sur.....	19
Etapa hidrotermal .....	19
Límites de la caldera.....	21
Secuencia de eventos en la zona de estudio.....	21
Características volcano-tectónicas.....	22
Fallas con expresión superficial.....	23
Falla de anillo caldérico.....	23
Falla Río Caliente.....	23
Falla Nejahuete.....	23
Falla La Gotera.....	24
Sistema de fracturamiento somero .....	24
Sistema de fracturamiento profundo .....	25
Geohidrología del área.....	25
Geohidrología subterránea .....	25
Acuífero somero.....	26
Acuífero profundo .....	27



<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA .....</b>	<b>28</b>
Preparación de muestras para análisis químico.....	29
Procesamiento de los datos obtenidos .....	31
<b>CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS Y PETROGRÁFICAS DE LAS ROCAS DEL YACIMIENTO.....</b>	<b>35</b>
Concentraciones de elementos en las rocas.....	36
Alteración hidrotermal.....	39
<b>CAPITULO V: ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO.....</b>	<b>42</b>
Análisis multivariado.....	42
Vectores y valores característicos.....	46
Método de análisis por componentes principales (ACP).....	48
Interpretación de los resultados.....	50
Matriz de varianza-covarianza.....	50
Matriz de correlación .....	50
Matriz de vectores y valores característicos .....	51
Matriz de componentes principales.....	52
Componente principal 1 .....	52
Componente principal 2 .....	53
Componente principal 3 .....	54
Componente principal 4 .....	55
Componente principal 5 .....	55
Otros componentes .....	55
<b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES .....</b>	<b>64</b>
Glosario.....	67
Bibliografía.....	69

## RESUMEN.

El campo geotérmico de La Primavera, se localiza a 5 Km al NW de la ciudad de Guadalajara, fisiográficamente se encuentra, en la intersección del sector occidental de la Cinturón Volcánico Transmexicano y la parte sur de la Sierra Madre Occidental. Está asociado a otras estructuras regionales importantes como: El Graben de Chapala (E-W), el Graben de Colima (N-S) y el Graben Tepic-Zacoalco (NW-SE).

Su historia geológica reciente inició hace 140,000 años con la extrusión de las Lavas Precaldera, terminando con la formación de las lavas de arco sur, siendo el domo El Colli el último en formarse hace 30,000 años. Las rocas asociadas con la historia geológica reciente son de composición riolítica con ligeras variaciones, presentando como mineralogía característica: sanidino sódico, cuarzo, ferrohedenbergita, fayalita e Ilmenita; además de vidrio volcánico también de composición riolítica.

Para la realización del presente trabajo, se analizaron recortes y núcleos de rocas de los 11 pozos geotérmicos que se encuentran en la zona, así como muestras de rocas superficiales, analizándose los siguientes elementos: Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, Ga, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Th, Pb, Au, Ag y Tl.

Las técnicas usadas para el análisis de las muestras recolectadas fueron: Fluorescencia de rayos X para la identificación de elementos mayores y traza, espectrometría de absorción atómica para la determinación de Au, Ag, y Tl. Además de difracción de rayos X y análisis petrográfico para identificar a los minerales de alteración.

Las rocas encajonantes del yacimiento, presentaron concentraciones anómalas de algunos elementos metálicos y traza comparables con las de otros campos en el mundo, a partir de las cuales, se hizo una correlación con los procesos que tienen lugar durante la formación de yacimientos hidrotermales del tipo epitermal. Se detectaron concentraciones de hasta 200 ppb de Au y 50 ppb de Ag en rocas superficiales cercanas a salidas de fumarolas.

Los datos geoquímicos obtenidos fueron vaciados en el paquete computacional *SURFER 6*, generándose secciones de isovalores que mostraron las distribuciones de cada uno de los elementos a profundidad. Posteriormente, se les dio un tratamiento estadístico con la ayuda del paquete *IDRISI FOR WINDOWS*. Con éstos paquetes, se obtuvieron parámetros estadísticos de la información geoquímica tales como medias, varianzas, desviaciones estándar, coeficientes de correlación, vectores y valores característicos y Componentes principales.

Se realizó un estudio de los parámetros por medio de la técnica de Análisis por Componentes Principales, técnica contemplada dentro del campo de estudios

estadísticos multivariados. Generándose imágenes que mostraron grupos con patrones similares de distribución bajo condiciones hidrotermales activas.

Algunos de los patrones más representativos obtenidos por este método fueron los correspondientes a los siguientes grupos de elementos Ni-Cr-Co-Cu, Zn-Rb y Au-Ag-Tl.

Al efectuar este tipo de procesamientos, fue posible conocer la distribución regionalizada de cada componente, es decir, se definieron gráficamente grupos con información homogénea. En términos geológicos la teoría de las variables gráficamente regionalizadas permitió definir la configuración de posibles patrones de distribución de metales y elementos traza.

La presencia de algunos de estos metales se debe a los drásticos cambios de temperatura y pH, pérdida de presión en el sistema y/o ebullición (siendo la ebullición una de las principales causas del decremento en la temperatura) de los fluidos hidrotermales, cambios en las condiciones redox de las soluciones (que pueden ser causados por dilución con aguas frías meteóricas infiltradas).

## CAPITULO I: INTRODUCCION

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 uso de la energía calorífica que es transportada a través de las rocas. La creciente necesidad de energéticos y recursos naturales, ha impulsado la búsqueda de fuentes alternas de energía contribuyendo al desarrollo de la exploración geotérmica (Armstead, 1989).

La energía geotérmica es energía calorífica originada y contenida en el interior de la tierra, pero el calor aprovechable desde el punto de vista práctico no es del núcleo ni del manto terrestre, sino la que se halla a menores profundidades dentro de la corteza terrestre. Desde el punto de vista termodinámico el uso de ésta se basa principalmente en la diferencia de temperatura entre la masa de roca y el agua del subsuelo, esta diferencia es la que permite la producción de energía geotérmica, que puede ser usada entre otras cosas para producir energía mecánica y/o eléctrica (Gutiérrez Negrín, 1991).

La energía térmica contenida en el interior de la Tierra es un recurso superado sólo quizá por la proveniente del Sol. Con propósitos y usos múltiples, la geoenergía es capaz de generar electricidad, de enfriar ó calentar el espacio, de producir materias primas industriales, de empleo en la agricultura, floricultura, acuicultura, balneología, así como la generación de yacimientos minerales (Armstead, 1989).

La exploración para la energía geotérmica, recibió un gran impulso entre los años 60's y 70's como resultado del aumento en el precio del petróleo. La consecuencia de esta exploración fue un beneficio incalculable en el conocimiento de procesos de disolución, efectos de la interacción agua-roca, transporte y depósito de elementos metálicos y, en cierto sentido los procesos de formación de depósitos minerales hidrotermales.

Los sistemas geotérmicos activos, se encuentran en áreas de reciente actividad tectónica e ígnea, muchos de los campos geotérmicos están asociados con estructuras volcánicas (especialmente calderas). La asociación preferente dentro de los sistemas, es con rocas dacíticas, riolíticas y andesíticas.

Las expresiones superficiales de los sistemas geotérmicos son: manantiales calientes, pozas de lodo hirviente, fumarolas, geysers, alteración hidrotermal de las rocas y otros indicios de actividad hidrotermal. Los fenómenos superficiales son generalmente una fracción muy pequeña, aproximadamente el 5% del tamaño total del sistema geotérmico (Henley, 1985).

En algunos casos, se tienen precipitados de material silíceo amorfo (*sínter*) en la superficie de los sistemas geotérmicos, como en las zonas de Taupo en Nueva Zelanda, Steamboat en Nevada (USA) y La Primavera en Jalisco (México).

Estos precipitados se forman alrededor de manantiales calientes sódico-clorurados, y pueden contener altas concentraciones de Au, Ag, W, As, Sb y Tl, en grado mena. La diferencia en las concentraciones entre el *sinter* y las aguas descargadas por los manantiales es enorme (por un factor de  $10^6$ ) como puede ser el caso del Au y Ag. Por otro lado, elementos tales como Pb, Zn, Cu, Te y Bi se encuentran concentrados en niveles más profundos; Así podemos afirmar que los sistemas geotérmicos tienen distintas zonas de metalización mineralización que varían con la profundidad y la temperatura (Pirajno, 1992).

## DEPÓSITOS EPITERMALES.

Los depósitos epitermales, al igual que los sistemas geotérmicos, son producto del vulcanismo relacionado con la actividad hidrotermal en profundidades someras y bajas temperaturas.

Generalmente, tienen lugar dentro del primer kilómetro de profundidad a partir de la superficie, en un intervalo de temperatura de 50 a 350°C, muchos depósitos se encuentran en forma de vetas, rellenos, fisuras irregulares, *stockworks*, brechas, vesículas y disseminación, las rocas cercanas a las vetas se encuentran muy alteradas. La mineralización epitermal tiene un número de características distintivas tales como la presencia de cuarzo, pseudomorfo del cuarzo, calcita y brechas hidrotermales. La asociación característica de elementos generalmente es: Au, Ag, As, Sb, Hg, Tl, Te, Pb, Zn y Cu. (Pirajno, 1992).

Muchos depósitos minerales, son el equivalente fósil de un sistema geotérmico (Pirajno, 1992). Similitudes entre sistemas geotérmicos y depósitos de metales base y preciosos fueron señaladas por Lindgren (1933).

Para generar un sistema geotérmico, es necesario tener algunos elementos "básicos" tales como:

- a) Una fuente de calor.
- b) Una cuerpo de rocas fracturadas, fisuradas y permeables, en las que se almacenan gran cantidad de agua y calor
- c) Una cuerpo rocoso superpuesto al anterior, que funcione como "sello" para que no permita la pérdida global de calor hacia la atmósfera.
- d) Zonas de permeabilidad primaria y/o secundaria que permitan la recarga de los fluidos (Chite, 1955), (Figura 1).

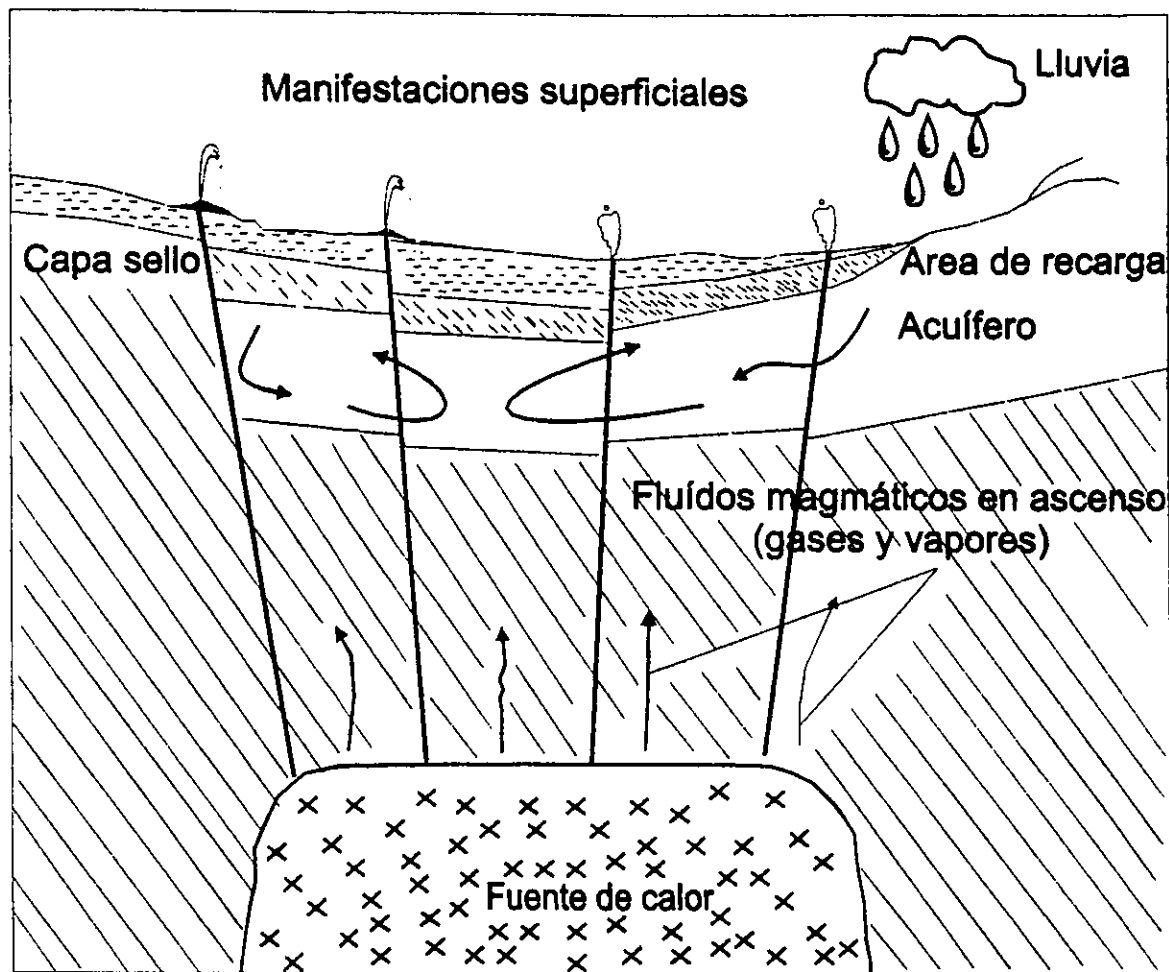


Figura 1. Elementos básicos de un sistema geotérmico.

La mayoría de los sistemas geotérmicos en el mundo pueden ser clasificados dentro de las siguientes 6 categorías:

- \*Sistemas hidrotermales dominados por vapor.
- \*Sistemas hidrotermales dominados por líquido.
- \*Sistemas magmáticos.
- \*Sistemas geopresurizados.
- \*Sistemas de roca seca caliente.
- \*Sistemas de rift.

### SISTEMAS HIDROTERMALES DOMINADOS POR VAPOR.

Este tipo de sistemas produce vapor supercalentado y en menor cantidad, otros gases como dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, y amonio, pero poca ó ninguna agua líquida.

Entre las manifestaciones superficiales más importantes de éstos sistemas se encuentran las fumarolas. Dentro del depósito asociado con una fuente geotérmica dominada por vapor, el vapor saturado y el agua coexisten siendo la

fase de vapor una función de la presión.

Bajo los depósitos dominados por vapor, probablemente existen salmueras calientes, pero la perforación no ha confirmado esto. En algunos casos los depósitos de vapor pueden presentarse como una capa en la parte superior de los sistemas hidrotermales dominados por líquido.

Algunos ejemplos de los campos geotérmicos dominados por vapor se encuentran en: Larderello y Monte Amiata, (Italia), Los Geysers y la Caldera Valles, (EUA), Matsukawa (Japón) (Tatsch, 1981); y entre los que presentan un sistema dominado por vapor sobre uno dominado por líquido se encuentra el campo de Los Azufres, México (Prol Ledesma, 1999, comunicación personal).

Actualmente, en Japón e Italia, se está trabajando en proyectos que tienen como objetivo descubrir los yacimientos que se suponen que existen a grandes profundidades (4 a 6 Km) por debajo de los yacimientos en explotación, por ejemplo en Larderello, Italia (Tatsch, 1981).

#### SISTEMAS HIDROTERMALES DOMINADOS POR LÍQUIDO.

Los sistemas dominados por líquido son aproximadamente 20 veces más abundantes que los dominados por vapor. El agua en los sistemas dominados por líquido, puede tener temperaturas que exceden a la temperatura de ebullición en la superficie.

Los manantiales calientes son la expresión superficial más importante en éstos sistemas. En la mayoría de ellos, el agua descargada en la superficie es una solución acuosa relativamente diluida de sodio, potasio, litio, cloro, bicarbonatos, sulfatos, boratos, sílice y algunos constituyentes menores.

Algunos de los principales campos dominados por líquido conocidos son Wairakei y Broadlands (Nueva Zelanda), Salton Sea y Yellowstone (EUA), Cerro Prieto, Los Azufres y La Primavera (México)

#### SISTEMAS MAGMÁTICOS.

En este tipo, la energía térmica se encuentra en la roca fundida ó casi fundida de cámaras magmáticas cercanas a la superficie, con temperaturas de 600°C a 1500°C. Estos sistemas están asociados con zonas de actividad volcánica reciente. Como ejemplos se encuentran Hawaii, Alaska (EUA), varios sistemas en Indonesia (Tatsch, 1976), y Kamchatka (U.R.S.S) (Armstead, 1989).

#### SISTEMAS GEOPRESURIZADOS.

Son sistemas asociados a cuencas sedimentarias profundas compuestas por areniscas y lutitas principalmente terciarias, compactadas bajo una columna de 2 ó 3 Km de sedimentos. Se producen cuando el flujo normal del calor es

atrapado por capas impermeables de arcillas en una zona de rápida subsidencia.

La presión en estos sistemas es significativamente mayor (del 40% al 90%) de la presión hidrostática que corresponde a la profundidad. El gradiente de temperatura se incrementa fuertemente en la zona de presión. El agua que ahí se encuentra, no es de origen meteórico sino de la deshidratación de los sedimentos marinos; que se encontró por algunos millones de años atrapada pero que no había podido escapar.

La mayoría de estos sistemas se encuentran limitados por fallas regionales y se extienden por cientos de kilómetros. Algunos de éstos sistemas se encuentran en el lado norte del Golfo de México, principalmente en los estados de Louisiana y Texas (EUA), también se encuentran presentes en Hungría (Armstead, 1989).

#### SISTEMAS DE ROCA SECA CALIENTE.

En estos sistemas el calor se encuentra enteramente en las rocas impermeables con una muy baja porosidad. Por lo regular son el resultado de actividad tectono-magmática, vulcanismo y un alto flujo de calor a lo largo de cinturones en todos los continentes.

Para poder extraer la energía de estos sistemas se hace circular un fluido para hacer un intercambio de calor entre la roca y fluido el cual toma el calor de la roca y lo lleva a la superficie (Tatsch, 1976).

#### SISTEMAS DE RIFT.

Estos sistemas se encuentran en rifts que se desarrollan en áreas de extensión cortical. Existen tres tipos, dependiendo de dónde ocurran, pueden ser oceánicos, continentales o islándicos.

Los primeros se encuentran en varias partes de los océanos; los islándicos incluyen Islandia y Nueva Zelanda; los continentales están el este de África, el Golfo de California en EUA, el Lago Baikal en Rusia y la Antártida (Tatsch, 1976).

La utilización de recursos geotérmicos depende en gran medida del grado de conocimiento que se tenga de éstos y de la cantidad y facilidad de extracción de la energía en cada tipo de sistema reconocido.

Con la finalidad de realizar estimaciones de carácter económico, geológico y de factibilidad técnica, es necesario contar con información como la anterior, que valorada en conjunto permita definir estrategias de desarrollo en función de lo que se tenga en cada lugar.

Ante la diversidad de propiedades que caracterizan a cada uno de los tipos



de sistemas, es necesario plantear simplificaciones y generalizaciones acerca de que tipo de información es la que aporta mayor nivel de conocimiento a un sistema en particular.

Claro, lo ideal es que, con el menor número de datos se tenga la máxima cantidad de información para valorar el potencial de una localidad.

## CAPITULO II. GEOLOGIA DE LA ZONA DE ESTUDIO

### LOCALIZACIÓN y ACCESO.

El Campo Geotérmico de La Primavera se localiza a 5 Km al NW de la Ciudad de Guadalajara, Jalisco, en el sector occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano.

Cercano a la intersección de tres elementos estructurales regionales: El Graben ó fosa tectónica de Colima con una orientación N-S, el Graben de Chapala y el Graben de Tepic, cuyas orientaciones son: E-W y NW-SE respectivamente (Figura 2).

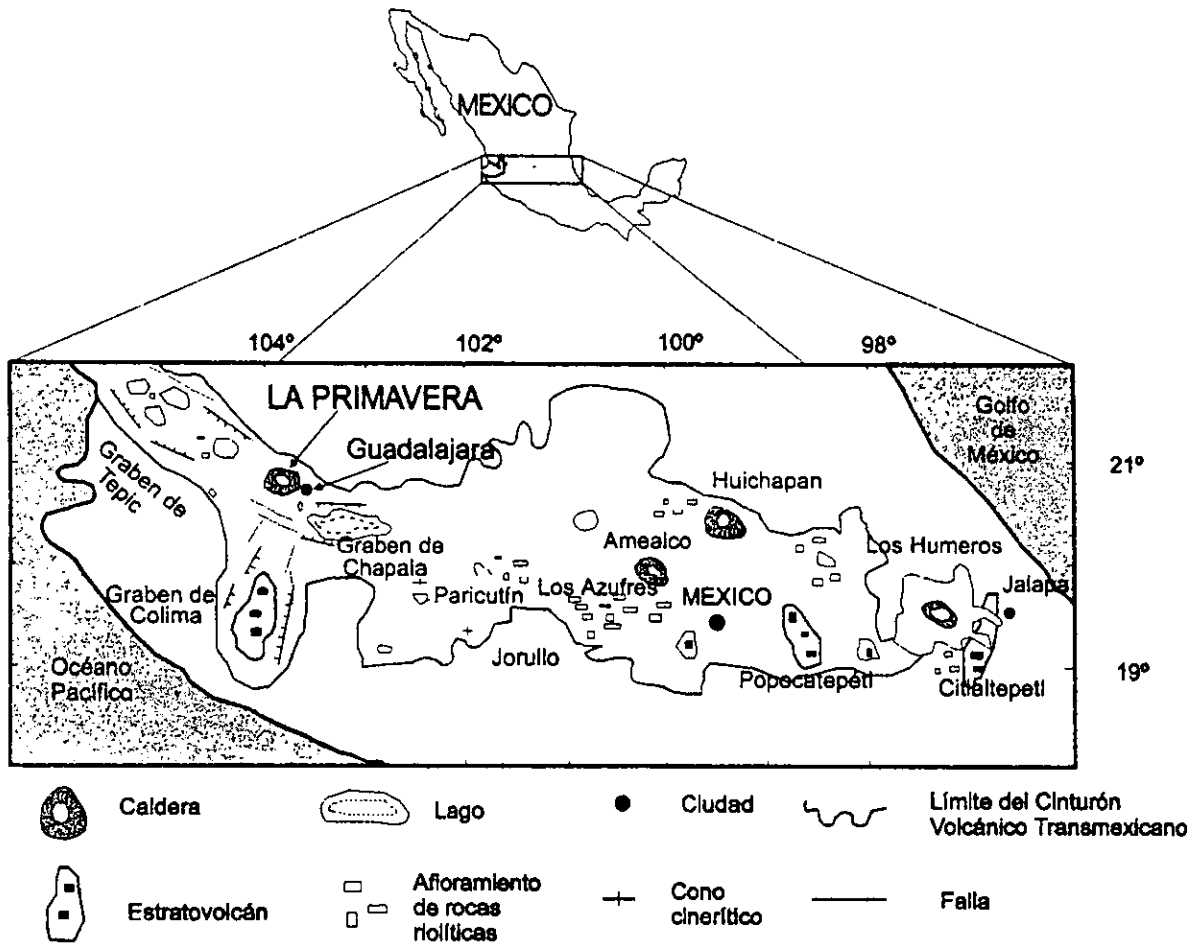
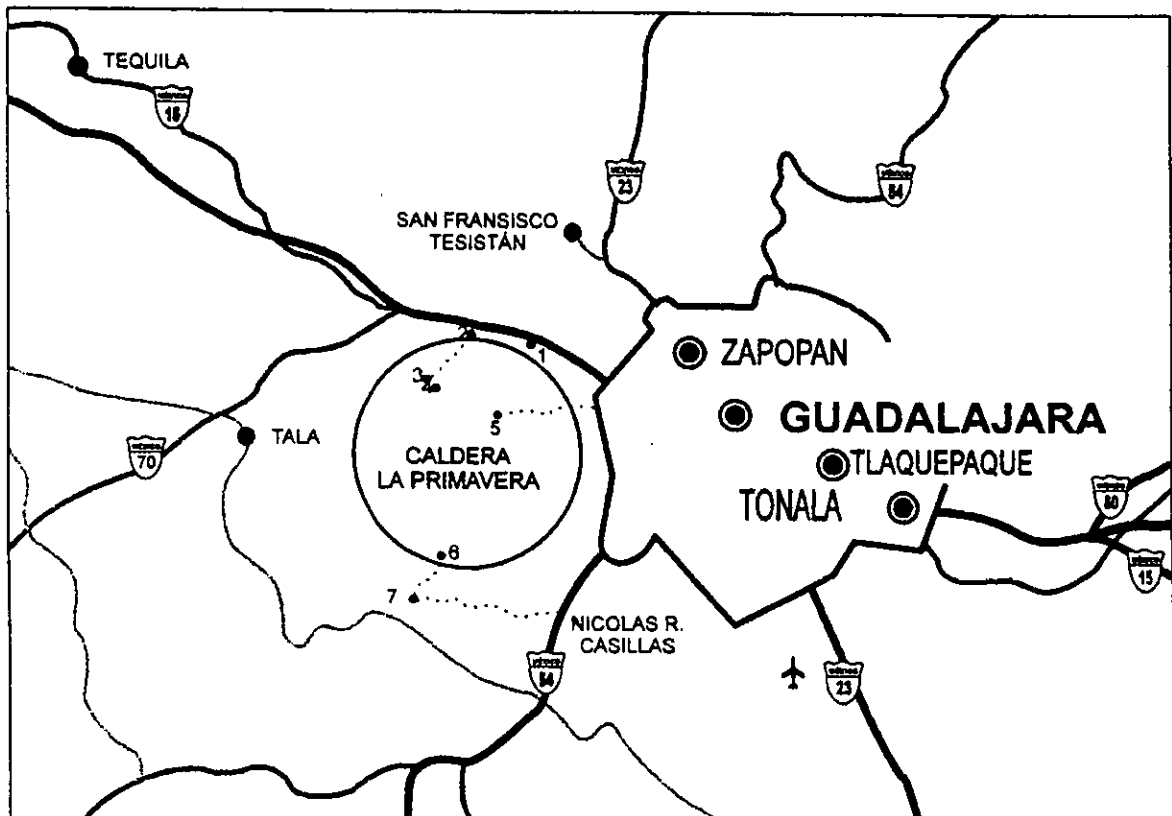


Figura 2. Localización de La Primavera en la Cinturón Volcánico Transmexicano (Modificado de Cruz Casas, 1998).

La zona de estudio se encuentra bien comunicada debido a la cercanía con la ciudad de Guadalajara. Las carreteras surcan el área en casi todas direcciones y tienen como punto en común dicha ciudad.

Para llegar a la caldera (Figura 3), partiendo de la ciudad de Guadalajara, se debe tomar la carretera No. 15, hacia el noroeste, la cual se dirige a Nogales, Sonora.

A la altura del Km 25 entronca la carretera No. 70, sobre la cual hay una desviación al poblado de La Primavera, y de allí por caminos vecinales se llega a los balnearios, arroyos y a la zona de pozos (Figura 4).



- |                           |                  |                         |
|---------------------------|------------------|-------------------------|
| 1. LA VENTA DEL ASTILLERO | 4. AGUA BRAVA    | 7. SAN ISIDRO MAZATEPEC |
| 2. LA PRIMAVERA.          | 5. ZONA DE POZOS |                         |
| 3. RIO CALIENTE           | 6. AGUA CALIENTE |                         |

Figura 3. Ubicación y accesos a la caldera de La Primavera (modificado de Cruz Casas, 1998).

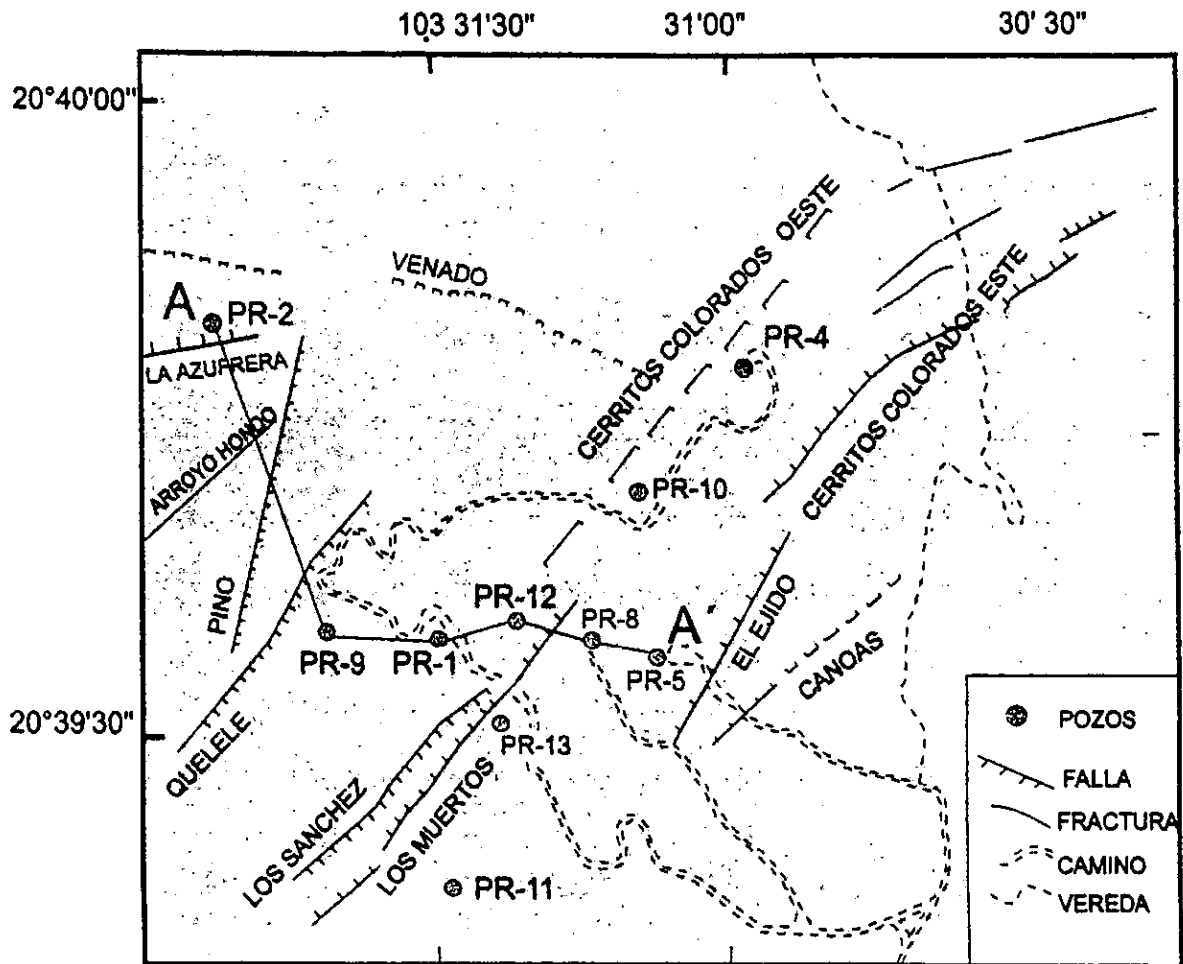


Figura 4. Ubicación y accesos a la zona de pozos de La Primavera, en la figura se aprecian las trazas de algunas fallas que son cortadas por los pozos y la sección A-A' sobre la que se hará mención más adelante.

## **GEOLOGÍA.**

El Cinturón Volcánico Transmexicano puede definirse como una faja de volcanes y complejos volcánicos de formación relativamente reciente que atraviesa al país de este a oeste (Figura 2), en la cual se alojan el 79 por ciento de las anomalías termales conocidas de México (Venegas, 1985).

La mayor concentración de focos termales se ubica en el borde norte del Cinturón Volcánico Transmexicano, coincidiendo con la presencia de calderas, como por ejemplo, La Caldera de Amealco en Querétaro, la Caldera de Los Humeros en Puebla y La Caldera de La Primavera en Jalisco (Torres, 1993)

El complejo de La Primavera es una caldera volcánica cuya formación se inició hace aproximadamente 140,000 años (Mahood, 1981a). Cuando una cámara magmática en ascenso creó un abombamiento de la superficie provocando la aparición de 2 zonas de fracturas "circulares" no concéntricas.

A través de dichas fracturas fluyeron los primeros domos y flujos riolíticos (El Cañón de las Flores, domo El León y Río Salado).

Los valles cercanos fueron rellenados, cubriendo un área de 700 km<sup>2</sup>, representando un volumen de 20 km<sup>3</sup> (Gutiérrez Negrín, 1991)

La rápida evacuación de la cámara magmática dejó un vacío en su porción superior lo que ocasionó un colapso circular de 11 Km de diámetro, el cual posteriormente se convirtió en un lago.

Mas adelante, hace aproximadamente 70,000 años ocurrió un levantamiento debido al aporte de nuevo magma a la cámara, formándose así la morfología actual, desapareciendo el lago y apareciendo los últimos domos y lavas riolíticas. Los domos más recientes tienen edades que fluctúan entre los 20,000 y 25,000 años.

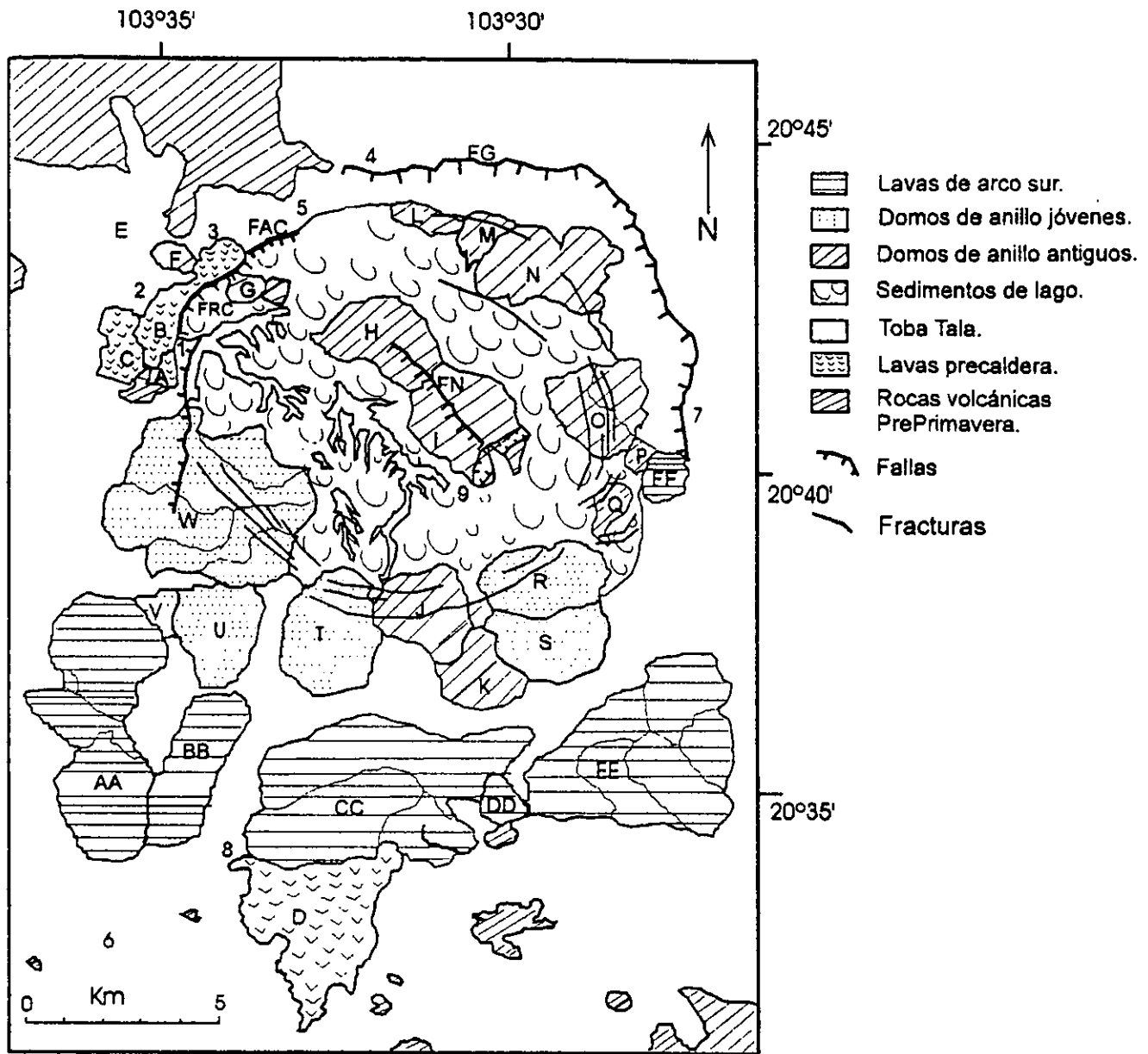


Figura 5. Geología simplificada del campo geotérmico de La Primavera (modificada de Mahood, 1980). A: domo Río Salado, B: flujo Cañón de las Flores, C: domo El León, D: grupo Arroyo Saucillo, E: domo El Chiquihuitillo, F: domo El Burro, G: domo El Chato, H: domo compuesto El Alto, I: domo compuesto El Nejahuete, J: domo El Tule, K: domo El Madroño, L: domo Pinar de La Venta, M: domo Arroyo La Cuartilla, N: domo La Lobera, O: domo El Chapulín, P: domo Dos Coyotes, Q: domo La Pila, R: domo Ixtahautonte, S: domo La Cuesta, T: domo El Culebreado, U: domo La Puerta, V: domo Arroyo Las Animas, W: domo El Pedernal, X: domo Totepec, AA: domo San Miguel, BB: flujo Llano Grande, CC: domo Las Planillas, DD: domo Arroyo Colorado, EE: domo El Tajo, FF: domo El Colli. Fallas: FAC: falla de Anillo Caldérico, FRC: falla Río caliente, FN: falla El Nejahuete, FG: falla La Gotera. Manantiales: 1: Río Caliente, 2: Balneario La Primavera, 3: Balneario Cañón de Las Flores, 4: La Gotera, 5: La Venta del Astillero, 6: Tierra Blanca, 7: Ciudad Granja, 8: Agua Caliente, 9: Cerritos Colorados.

## **BASAMENTO.**

El basamento de la columna está representado por un cuerpo ígneo de composición granítica a granodiorítica de edad Mioceno Tardío (> 7.3 millones de años, Gutiérrez Negrín, 1991).

El cuerpo tiene afinidad con los granitos Cretácicos-Miocénicos expuestos a lo largo de la margen oeste de México (Alatorre and Enríquez, 1992). Dicho basamento fue detectado durante la perforación del pozo exploratorio PR-9 a 2780 m de profundidad (JICA, 1989).

## **VULCANITAS CORDILLERANAS.**

El basamento prevolcánico es poco conocido por haber sido afectado (fundido parcialmente) durante el ascenso de los magmas de La Primavera. En cortes del Río Grande de Santiago se encuentran expuestas las rocas más antiguas, son rocas volcánicas del Plioceno (> 2 millones de años). Esta es una secuencia de andesitas y tobas líticas, llamada Vulcanitas Cordilleranas, siendo las mismas que han sido consideradas como el basamento de la Cinturón Volcánico Mexicano (Gutiérrez Negrín, 1988).

## **LAVAS PRECALDERA.**

Las Lavas Precaldera (Figura 5), formadas hace 140,000 años (Mahood, 1981) son composicionalmente el grupo eruptivo más heterogéneo, de material piroclástico con una matriz de vidrio con cuarzo y sanidino (Hernández, 1996). Estas lavas afloran en 2 áreas (Figuras 5). En el área norte, el domo porfirítico Río Salado fue el primero en ser extrusionado, seguido por el flujo Cañón de las flores. Ambas unidades están sobreyacidas por el domo El León y por la Toba Tala. Estas tres unidades no muestran cambios químicos con el tiempo. Las lavas del domo El Pedernal también fueron emitidas antes del depósito de las ignimbritas de la Toba Tala y la formación del lago (los que serán tratados posteriormente).

## **ERUPCIÓN IGNIMBRÍTICA (Toba Tala).**

Hace unos 95,000 años se produjo una erupción pliniana acompañada de nubes ardientes que dio lugar a la formación de una ignimbrita distribuida en un área de 700 km<sup>2</sup> (López, 1991), que al depositarse y enfriarse estos flujos constituyeron las rocas que se conocen como la Toba Tala (Gutiérrez Negrín, 1991) y una pómez de caída. Su composición química es riolítica ligeramente zoneada, en un inicio es peralcalina y va cambiando a metaluminosa al término de la erupción (López, 1991).

En realidad la Toba Tala es una gran cantidad de pequeños flujos piroclásticos, los cuales se depositaron sobre todo dentro de la caldera. Su espesor varía de .5 a 70 m en el exterior de la caldera y de 200 a 700 m en el

interior. Su volumen aproximado es de 32 km<sup>3</sup> (López, 1991). La Toba Tala se encuentra dividida en tres paquetes importantes:

La primera unidad la conforma el primer emplazamiento, que es el 90% del volumen total. Este contiene pómez blanca incipientemente soldada y con compactación variable. Se encuentra en tres direcciones principalmente: hacia el W más allá del poblado de Tala, al NE cubre la zona NW de la Cd. de Guadalajara, al S no se observa su límite pero podría llegar al domo El Tepopote (López, 1991).

La segunda unidad es un horizonte de unos 10 m de espesor, caracterizado por contener una pómez fina de color blanco, con textura afanítica, y otra pómez de color gris, más gruesa con fenocristales aislados de cuarzo y sanidino (López, 1991).

La tercera unidad tiene un espesor de 5 a 10 m, se encuentra formada por fragmentos de pómez blanca que contienen menos del 1% de cuarzo y sanidino dispersos en una matriz de grano fino color rosa pálido. En muchos lugares, el tercer miembro muestra intercalación de flujos de ceniza laminados y capas de caída de gravedad (Hernández, 1996).

El segundo y tercer depósitos de la Toba Tala ocurrieron solamente en la parte central de la caldera de La Primavera, éstos no se depositaron fuera en cuencas cercanas, lo que sugiere que el colapso del techo de la cámara magmática comenzó después la primera unidad de la Toba Tala, por lo que las dos siguientes unidades fueron enteramente depositadas dentro de la cuenca de colapso (Mahood, 1981b).

## **COLAPSO DE LA CALDERA.**

El colapso no se dio como un pistón sino a lo largo de un arreglo de fracturas en anillos no concéntricos (Figura 5). El límite de la falla de anillo se presenta al oeste de Río Caliente, donde las Lavas Precaldera son truncadas. A lo largo de la circunferencia de la cuenca, el colapso ocurrió como una serie de fallas escalonadas (Mahood, 1980).

Aunque no existen desniveles importantes que permitan detectar a primera vista una caldera los rasgos anteriores lo evidencian (Demant y Vincent, 1978). La caldera formada tiene 11 Km de diámetro (Ferriz, 1986), (López, 1991).

## **SEDIMENTACION LACUSTRE.**

La caldera fue llenada rápidamente por agua, formándose un lago en su interior y los sedimentos comenzaron a depositarse en la cima de la Toba Tala, estos sedimentos consisten predominantemente en capas de 15 a 50 cm de espesor de ceniza y lapilli, con estratificación planar horizontal y cruzada de bajo ángulo y gradación de tipo normal.



Después tuvo lugar una depositación de un horizonte de 3 a 13 m de espesor, de bloques de pómez gigantes, formado por el desprendimiento de la cubierta pumicítica de algunos domos que se emplazaron dentro del lago. Los bloques de pómez (de entre 0.3 - 6 m de diámetro), se encuentran embebidos en una matriz diatomeácea y de ceniza, deformada alrededor de los bloques de pómez.

Este horizonte fue depositado en unos 110 km<sup>2</sup> del lago. El paquete de sedimentos está formado por tres niveles, dos de ellos arcillosos, separados por el horizonte de bloques de pómez gigantes.

El paquete arcilloso inferior, en su parte más baja contiene gran cantidad de pómez retrabajada, ceniza gruesa y lapilli pumicítico, presentando estratificación muy fina. El espesor de este paquete es variable dependiendo de la topografía anterior y de la distancia de los centros de aporte, variando de 1 a 30 m (López, 1991).

Los depósitos lacustres forman la parte superior de los domos sub-horizontales y su espesor puede alcanzar más de 100 m (Demant, 1978). La altura promedio de los depósitos lacustres en la caldera de La Primavera es de 1800 m.s.n.m. Se encuentran aproximadamente 200 m por encima del nivel de la planicie de Guadalajara (1,600 m.s.n.m.). Lo cual indica un levantamiento central por la formación de un domo de resurgimiento.

### **DOMOS ANULARES ANTIGUOS (DOMOS CENTRALES).**

La actividad que siguió al colapso de la caldera, llevó a la extrusión de domos a lo largo de dos arcos no concéntricos: unos a lo largo de la fractura de anillo en la margen NE del lago y otros a través de la parte media del lago. Dicha actividad inicia con la erupción de los domos El Nejahuete y Las Pilas. Posteriormente mientras ocurrió depositación de sedimentos, se emplazaron los domos El Alto, El Chato y el domo El Burro (López, 1991).

Un domo fue emplazado en la parte más baja del domo El Nejahuete en el nivel estratigráfico del horizonte de pómez gigante en la porción sur central del lago. El horizonte de pómez gigante y el domo central sur contienen menos del 1% de fenocristales, a diferencia de los domos formados posteriormente que desde el punto de vista estratigráfico sobreyacen al horizonte de pómez gigante y que tienen aproximadamente 10% de fenocristales (Mahood, 1981a).

En el domo El Nejahuete y el domo El Alto la zona de alimentación fue utilizada por segunda vez al fragmentarse un segundo domo, dando lugar a domos compuestos. Simultáneamente a los domos anteriores, se da la extrusión de domos riolíticos sobre el anillo formado por la falla caldérica, dando lugar al domo Pinar de la Venta, domo La Lobera, domo El Chapulín y El Tule, éstos aparatos tienen aproximadamente 10% de fenocristales y en conjunto alcanzan un volumen de 5 km<sup>3</sup> de magma.

## **DOMOS ANULARES MÁS JÓVENES.**

Hacia la parte sur del lago se formó un nuevo grupo de domos hace 75 000 años. Las lavas afíricas y riolíticas de textura porfídica, derramadas en la porción S y SW del lago (domos El Pedernal, Agua de Victoriano, El Culebreado y El Ixtahuatonte) constituyen 3 km<sup>3</sup> de magma (López, 1991).

## **LEVANTAMIENTO.**

El levantamiento que dio origen a la morfología actual de La Primavera, provocó el fin de la sedimentación hace aproximadamente 60,000 años. Mucha de la expresión geomórfica de la caldera fue destruida por que la línea base del levantamiento coincidió con la fractura de anillo de la caldera. Las grandes fallas asociadas a este levantamiento son paralelas al margen de la estructura (Mahood, 1981a).

El levantamiento ligado al domo de resurgimiento fue del orden de 250 a 300 m (Demant, 1978) de manera asimétrica, es decir más intenso en la margen sur del lago (Mahood, 1981a). La escasez de fallas cortando los sedimentos sobre el horizonte de pómez gigante dentro de la parte central del lago indica que el levantamiento fue en forma de pistón. La máxima deformación se concentró en los márgenes del lago con inclinaciones radiales de 10 a 20° y de 2° en la parte central (Mahood, 1981b).

## **LAVAS DE ARCO SUR.**

El levantamiento terminó, hace 60,000 años, con la erupción, de 7 km<sup>3</sup> de magma a través de tres centros eruptivos en la porción sur, San Miguel, Las Planillas y El Tajo. También se eyectaron 3 flujos piroclásticos de volumen reducido, cuyos centros de emisión son probablemente el domo San Miguel y el domo Las Planillas.

Las lavas son generalmente más jóvenes hacia el este, registrando edades que van desde 68,000-60,000 a 25,000 años en el domo El Tajo y 30,000 en el domo El Colli.

## **ETAPA HIDROTHERMAL.**

Al final de las erupciones riolíticas, la cámara magmática inició su etapa hidrotermal ó final de su evolución, formando en los últimos 20,000 años un sistema geotérmico (Gutiérrez Negrín, 1991). Representado por la emisión de vapor en la porción centro-sur de la caldera y aguas calientes en el borde noroccidental de la misma (Figura 6). Estos manantiales termales dan lugar a los balnearios Cañón de Las Flores, La Primavera, Río Caliente, y Agua Caliente al sur, que se localiza fuera del límite de la caldera. (Demant, 1978).

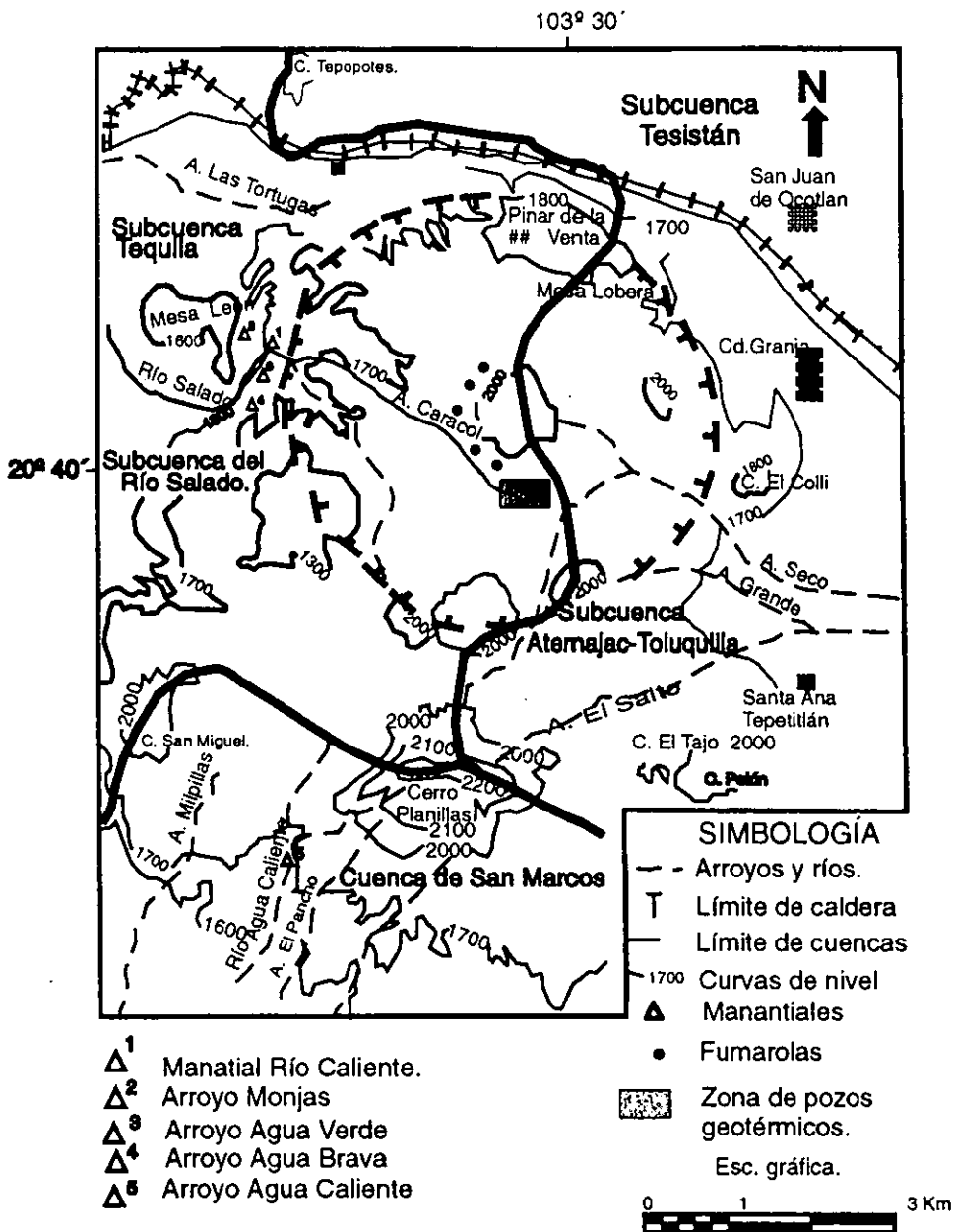


Figura 6. Ubicación de fumarolas y manantiales en La Primavera.

Los manantiales termales fluyen todo el año con temperaturas promedio de 65°C y de acuerdo a la clasificación de Píper, sus aguas son del tipo bicarbonatado-sódico lo cual ha sido interpretado como una mezcla de agua meteórica de infiltración reciente con fluidos geotérmicos profundos (Gutiérrez Negrín, 1991).

Las manifestaciones termales en La Primavera están asociadas con tres sistemas de fallas sub-verticales principales con buzamiento al occidente.

### **LÍMITES DE LA CALDERA.**

En La Primavera no existen desniveles importantes que permitan delimitar fácilmente una caldera. Sin embargo, existe un acantilado de 30 m de altura y de forma curva que sigue al norte desde la Venta del Astillero hasta Ciudad Granja siendo probablemente el límite septentrional de la caldera.

Al noroeste, en el Cañón de las Tortugas, afloran riolitas terciarias pertenecientes al domo El Tepopote lo que indica que esta área está fuera de la caldera; el límite de ésta probablemente corresponde con la falla de Río Caliente.

En otras áreas de La Primavera, no existen evidencias de campo para ubicar el límite de la caldera. Sin embargo, los domos riolíticos más meridionales han producido derrames que fluyen hacia la periferia de la caldera, lo que indica que se formaron en el flanco de la zona levantada y afuera de la zona central hundida. Por lo tanto, el límite probable de ésta se encuentra entre los dos anillos de riolitas (Demant, 1978).

### **SECUENCIA DE EVENTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.**

La perforación de los pozos hecha por la CFE, aunadas a las fechamientos hechos por Mahood, (1981a) y observaciones de campo de diferentes autores, han permitido conocer la secuencia litológica y de eventos que ocurrieron en la zona de estudio (Figura 7).

- \*El basamento granítico
- \*Erupción de una secuencia de andesitas intercaladas con tobas y escasas riolitas (secuencia PrePrimavera "Vulcanitas Cordilleranas").
- \*Lavas Precaldera (domos Cañón de las flores, domo El León, domo Río salado y domo El Pedernal).
- \*Erupción de las Ignimbritas pertenecientes a la Toba Tala.
- \*Colapso de la parte superior de la cámara magmática y formación de una caldera de 11 Km de diámetro
- \*Formación de un lago en la parte central.
- \*Depósito sedimentos lacustres y pómez post-caldéricos (Formación Arroyo El Caracol)
- \*Erupción de los domos centrales (Domos anulares antiguos, domo El Nejahuete, domo El Alto, domo El Chato y domo EL Burro).
- \*Erupción de los domos anulares más jóvenes (domo El Pedernal, domo Agua del Victoriano, domo El Culebreado y el domo Ixtahuatonte).

\*Elevación del terreno y desaparición del lago.

\*Erupción de las lavas del grupo sur (San Miguel, Las Planillas, EL Tajo y El Colli).

\*Etapa hidrotermal y manifestaciones geotérmicas.

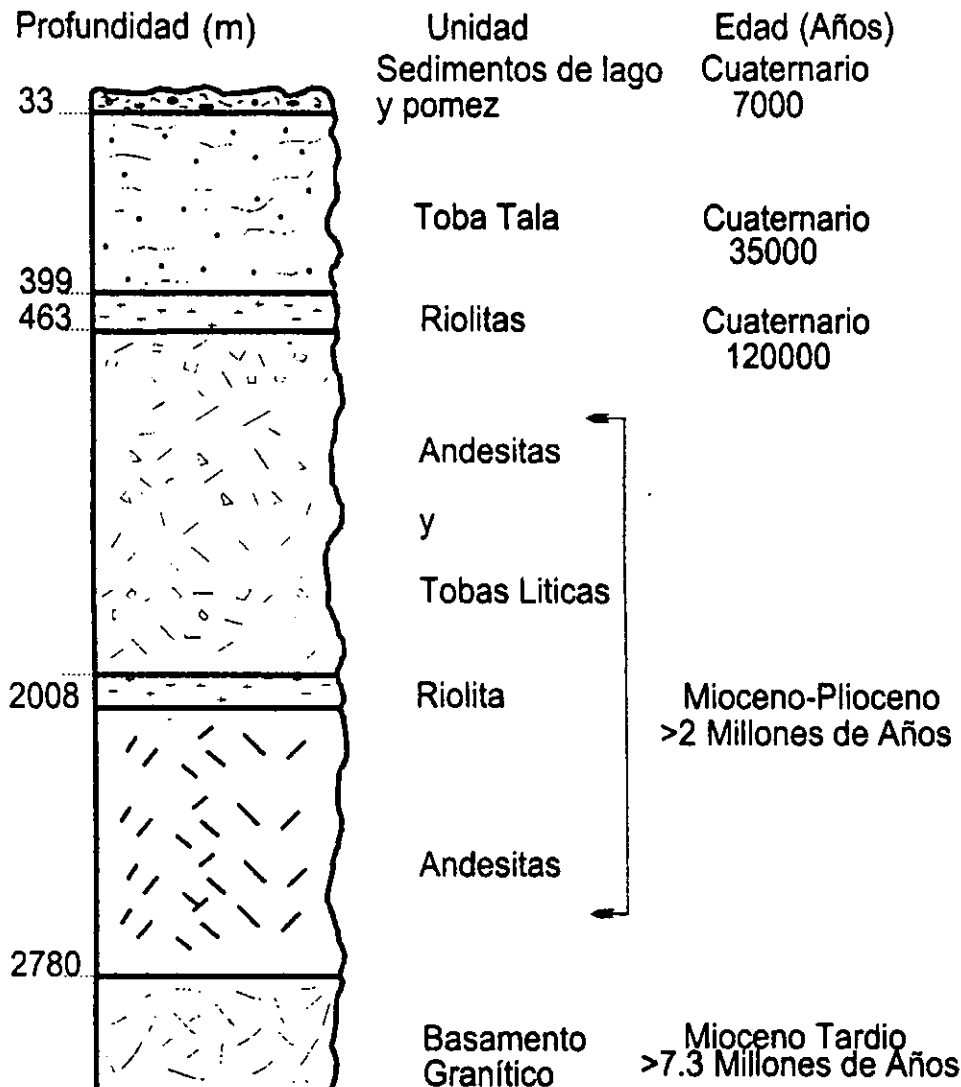


Figura 7. Columna estratigráfica en La Primavera (Gutiérrez Negrín, 1991).

### CARACTERÍSTICAS VOLCANO-TECTÓNICAS.

En la zona convergen tres sistemas estructurales: El Graben de Chapala (E-W), el Graben de Colima (N-S) y el Graben Tépic-Zacoalco (NW-SE) (Figura 2). La Caldera de La Primavera se encuentra dentro de una de las dos depresiones que forman el Graben de Tépic-Zacoalco, la depresión Tequila-Guadalajara. En

esta depresión se encuentran dos centros volcánicos importantes, el Volcán de Tequila y La Caldera de La Primavera, ambos emplazados sobre la misma debilidad cortical.

Sin embargo, las fallas que se observan en la zona no reflejan la dirección de los esfuerzos regionales y en particular, su distribución se restringe a la zona de la caldera, lo cual es evidencia de que el sistema de fallas y fracturamiento más joven se asocia a los procesos de máxima deformación del ciclo caldérico: el colapso y el resurgimiento. La última etapa de asentamiento central de la caldera dio origen al fracturamiento NW-SE y NE-SW, sujetos a esfuerzos de tensión ya que la mayoría de las fallas son de tipo normal.

La zona geotérmica en estudio está afectada principalmente por fallas NW-SE, NE-SW y N-S, presentando manifestaciones termales en forma de fumarolas como en Cerritos Colorados, Las Barrancas, La Azufrera y El Nejahuete, así como afloramientos de manantiales en Río Caliente (Villa, 1987).

## **FALLAS CON EXPRESIÓN SUPERFICIAL.**

### **FALLA DE ANILLO CALDÉRICO.**

Esta falla es la más importante y más antigua pero solamente se observa alrededor de 5 Km de traza en la zona de Río Caliente, cortando a los domos El Salado y Cañón de la Flores (FAC, Figura 5), con un escarpe de 50 m. Su continuación es inferida por un rasgo circular que forman el anillo de domos al N, NE, S y SE, lo que sugiere una zona de debilidad. Otra evidencia es la forma circular que se observa en la cartografía de los depósitos lacustres (López, 1991).

### **FALLA RÍO CALIENTE.**

Esta falla tiene una traza arqueada que coincide prácticamente con la falla caldérica (FRC, Figura 5), pero tiene un desplazamiento invertido debido a que se relaciona con el levantamiento. Su longitud es de 6 Km se extiendiéndose desde la Venta del Astillero, hasta la zona de Río Caliente, donde alcanza su máxima expresión de 100 m (Mahood 1980a) y continúa hasta el domo El Pedernal. Por su relación con el levantamiento debido al aporte de magma en la zona de anillo sur, se le calcula una edad cercana a los 60 000 años.

### **FALLA NEJAHUETE.**

Se localiza en la zona central de la caldera (FN, Figura 5), afectando a los domos El Alto y El Nejahuete, su traza puede continuar hacia el SSE por la presencia de un cráter de explosión freática y un derrame fisural de riolitas. En la cima del domo El Nejahuete forma un pequeño graben de 1 Km de largo por 0.4 Km de ancho (López 1991).

Existen un par de fallas perpendiculares a la descrita, localizadas al sur del domo, que forman el Graben Cerritos Colorados, de 2 Km de largo por 0.5 Km de ancho cuyo desnivel aproximado es de 40 m (Mahood, 1980).

### **FALLA LA GOTERA.**

Se localiza al norte del anillo de domos antiguos como un escarpe arqueado de trazo irregular de 13 Km de longitud y 20 m de salto, que va desde el domo El Colli hasta el este de la población La Gotera. Para Mahood (1980) La Gotera es una falla paralela al colapso, que pudo formarse poco tiempo después de éste, López (1991) considera que es una estructura secundaria, e incluso un rasgo morfológico debido a la erosión diferencial de los materiales.

En La Primavera, existen dos sistemas de fracturamiento importantes, uno somero por encima de los 1000 m de profundidad y otro por debajo de los 1000 m de profundidad, donde se encuentra el yacimiento geotérmico principal (JICA, 1989).

### **SISTEMA DE FRACTURAMIENTO SOMERO.**

El sistema de fracturamiento somero se compone de las fallas, juntas y fracturas tensionales en la Toba Tala. Las fallas predominantes tienen orientaciones NE-SW, no todas tienen expresión superficial pero han sido detectadas por JICA durante la perforación (JICA, 1989). Varias manifestaciones geotérmicas se encuentran a lo largo de ellas.

En La Primavera se encuentran fracturas con orientación NW-SE, N-S y E-W al sur y sudoeste de la caldera y pueden ser divididas en tres sistemas.

El primer sistema puede ser trazado a 8 Km al suroccidente de La Gotera, el desplazamiento de esta falla alcanza un máximo de 100 m cerca de Río Caliente y decrece al norte y al sur. Todas las emisiones de manantiales de la Toba Tala frecuentemente ocurren a lo largo de las separaciones dentro de ésta (Mahood et al 1983).

Una segunda falla principal esta marcada por un escarpe irregular de 10 a 20 m en un arco de 13 Km a lo largo de la margen nordeste del complejo. Un manantial tibio emana de un escarpe en una tefra de caída que sobreyace a la Toba Tala en La Gotera.

El tercer sistema de fallas corre 9 Km a través del centro del complejo en un arco cóncavo suave al suroccidente sobre la parte superior del domo El Nejahuete, (su expresión es un escarpe de 5 a 10 m). La parte sur de la traza de la falla está marcada por un derrame de lava pumicítico.

Perpendicular a la traza de la falla arqueada hay un pequeño graben de 2 Km de largo y 0.5 Km de ancho, el cual baja al sur del domo El Nejahuete con un

máximo de 40 m de profundidad, decenas de fumarolas emanan de los límites de fallas del graben, donde la roca está fuertemente alterada a minerales arcillosos. Cientos de pequeñas fumarolas surgen de la toba solidificada en un área conocida como Las Barrancas. 1 Km al norte, aisladas de estas emanaciones, existen salidas de vapor sobre la traza de la falla La Azufrera. Este lugar presenta una intensa alteración de tipo ácida y contiene una gran número de vigorosas fumarolas (Mahood et al 1983).

### **SISTEMA DE FRACTURAMIENTO PROFUNDO.**

El sistema de fracturamiento profundo está caracterizado por fracturas de extensión con direcciones NW-SE con inclinación hacia el NE en las Vulcanitas Superiores. En el contacto entre el piso de la andesita y las Vulcanitas Cordilleranas entre los 1800 y 2000 m de profundidad existe una estructura dómica con orientación N-S inclinada 30°, con fallas NW-SE e inclinación al NE (JICA, 1989).

Como el yacimiento principal del área se encuentra en las fracturas de las Vulcanitas Cordilleranas es importante conocer sus características. Estas fracturas tienen tendencias NVV-SE, NNE-SSE y ENE-WSW, las cuales se observan a lo largo del Río Santiago al noreste de la Caldera.

### **GEOHIDROLOGÍA DEL AREA.**

Desde el punto de vista hidrográfico, la zona de estudio se encuentra dentro de tres cuencas independientes que son: Río Grande Santiago, Río Ameca y San Marcos (Figura 6).

El gasto de manantiales termales, como el de Río Caliente presenta una tendencia a mantenerse constantes en los ocho meses que dura el estiaje de la zona, incluso en los meses que anteceden a la temporada de lluvias. Por lo tanto, gran parte del volumen de agua de los manantiales de Río Caliente "debe provenir de un acuífero regional profundo" (Ramírez, 1982).

En las dos estaciones de aforo en el arroyo Río Caliente se detectó una diferencia positiva entre los gastos registrados en ellas, aumentando el gasto de la primera a la segunda que se encuentra aguas abajo, lo que confirma que aparte de los manantiales registrados existen otras zonas de aporte distribuidos a lo largo del cause del río; lo mismo pasa con otras estaciones en los otros arroyos (Ramírez, 1982).

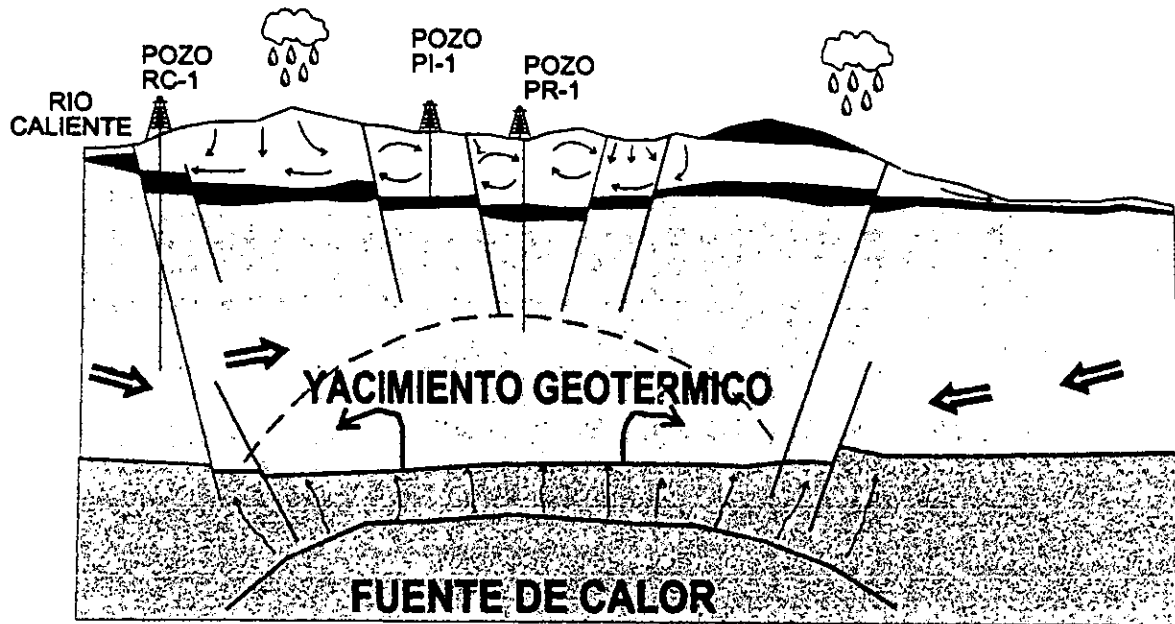
### **GEOHIDROLOGIA SUBTERRÁNEA.**

En el caso de La Primavera, el flujo subterráneo se encuentra controlado principalmente por el fracturamiento, tanto a niveles superficiales como profundos.



Los estudios geohidrológicos realizados mediante pozos de exploración, perforados por la C.F.E para el campo de La Primavera, han definido la presencia de un sistema compuesto de por lo menos 2 acuíferos.

(1), un acuífero profundo regional relacionado con el yacimiento geotérmico (más de 1000m de profundidad), ubicado en las andesitas inferiores, con circulación de fluidos a través de fallas, contactos litológicos y fracturas preferencialmente y (2), un acuífero somero, en su mayor parte freático de menor temperatura contenido en la Toba Tala (Figura 8).



- |  |   |  |                                |
|--|---|--|--------------------------------|
|  | Acuífero somero (Depositos lacustres y Toba Tala) |  | Basamento intrusivo            |
|  | Acuífero profundo (Andesitas, tobas y ríolitas)   |  | Acuífugo (Ríolitas superiores) |

Figura 8 Esquema del funcionamiento geohidrológico del campo geotérmico de La Primavera (Gutiérrez Negrín, 1980)

### ACUÍFERO SOMERO.

El acuífero somero es de tipo termal, con temperaturas de 70 a 120°C, está contenido en las ignimbritas de la Toba Tala, el nivel del agua en la zona de los pozos geotérmicos alcanza una altitud de 1570 a 1600 m.s.n.m. (pozos PI-1 y PR-4), Su área de recarga es la propia caldera de La Primavera.

Con ayuda de la litología obtenida por medio de los pozos perforados, se ha estimado que la base de este acuífero se sitúa entre 1400 y 1410 m.s.n.m. desde la zona de Río Caliente hasta el pozo PR-2 y se profundiza hacia el centro de la caldera a 1150 m.s.n.m en el pozo PR-4 y 1325 m.s.n.m. en el pozo PR-5 (Cerriteño, 1991).

Los basaltos y andesitas relacionadas al Volcán de Tequila, así como los domos riolíticos de la caldera de La Primavera, constituyen las zonas de recarga del acuífero somero.

Con la infiltración de las aguas pluviales y las aportaciones del acuífero termal profundo se produce la descarga de los manantiales en la zona de Río Caliente y aledañas, para salir de la caldera y descender por el Valle de Tala y el Valle del Río Salado hacia el Valle de Ameca (Cerriteño, 1991).

### **ACUÍFERO PROFUNDO.**

Es un segundo acuífero relacionado con el sistema geotérmico, se manifiesta mediante los manantiales calientes y fumarolas de la zona (Figura 6). El acuífero regional profundo está contenido en andesitas que afloran al SE de la caldera y se profundizan en dirección a ella. Esta disposición propicia un flujo subterráneo de SE a NW, quedando la zona de recarga al SE de Cajititlán, Jal. (Venegas, 1988)

El funcionamiento del acuífero profundo es el siguiente: La zona de recarga se ubica hacia el sureste de la caldera, a la altura donde se encuentran los poblados de El Salto y Cajititlán, ya que ahí afloran las andesitas basálticas. La presencia del Río Grande de Santiago constituye otra fuente de recarga así como también las tobas que rellenan gran parte del Valle de Toluquilla.

### CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

El geólogo que tiene una cantidad considerable de datos, como es el caso de éste trabajo, debe usar herramientas estadísticas formal ó informalmente, con éstas bases, el investigador puede mejorar la confiabilidad de sus conclusiones evitando así la presencia de tablas de datos numéricos que muchas veces son superfluas en un reporte (Koch & Link, 1980).

Así, cuando en el estudio de un fenómeno intervienen parámetros de distinta naturaleza aportando cada uno de ellos una "fracción" de la información del fenómeno total, es conveniente usar técnicas de análisis de información que den alguna idea, primero de la influencia individual y luego de la colectiva de tales parámetros.

La primera etapa en el análisis de información se refiere a la variación individual de cada parámetro mediante la determinación de los parámetros estadísticos que tienen que ver con una tendencia central; media, varianza, desviación estándar y valores de dispersión de los datos. Estos estimadores proporcionan criterios muy útiles para la interpretación preliminar de la información a través de histogramas, semivariogramas, modelos de distribución, secciones de isovalores, imágenes de distribución (como en este trabajo) e intervalos naturales de variación de un parámetro. En esta etapa de análisis los resultados obtenidos se refieren a la información global, no se evidencian (todavía) las interrelaciones entre las distintas variables ni los efectos de la geometría de los datos.

La segunda etapa comprende el análisis de correlación entre variables mediante técnicas de análisis multivariado, una de ellas, el Análisis por Componentes Principales (ACP) reestructura la información creando un número mínimo de variables (llamadas Componentes Principales) que son combinaciones lineales de las variables originales, de tal forma que las nuevas variables contienen la misma cantidad de información. Este análisis no resuelve por sí mismo el problema, los resultados producidos requerirán siempre de un razonamiento geológico a fin de entender la naturaleza de las nuevas variables.

Para el caso del presente estudio, el número total de variables fue de 18, las cuales cubren una diversidad de comportamientos geoquímicos no siempre evidentes entre ellas. Así dentro de las variables químicas, se tienen las concentraciones en ppm de Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, Ga, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Th, Pb, Au, Ag y Tl, las cuales habrán de ser correlacionadas entre ellas y con otras mediciones como la profundidad a la que fue extraída la muestra, la litología correspondiente, fallas y fracturas presentes en la zona.

La tercera y última etapa del procesado de información geológica, centran su atención en la organización geométrica de los datos. De acuerdo a la distribución espacial de la información y su variación a lo largo de ciertas direcciones definidas por el analista se determinan las distancias máximas de influencia de cada dato.

Para el caso de La Primavera dichas direcciones se refieren sobre todo a la profundidad de donde fueron obtenidas las muestras y la localización de los pozos dentro del campo. Trabajos anteriores muestran diferentes técnicas de estudio para analizar sobre todo la movilidad de elementos traza durante la actividad hidrotermal (Christidis G.E., 1998).

Al efectuar este tipo de procesamiento, se conoce la distribución regionalizada de cada componente, es decir, se definen gráficamente grupos con información homogénea. En términos geológicos la teoría de las variables gráficamente regionalizadas permite definir la configuración de posibles patrones de distribución de metales y elementos traza.

## PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS QUÍMICO.

Para la realización del presente trabajo se analizaron recortes y núcleos provenientes de los 11 pozos geotérmicos que se encuentran en el campo, además de muestras superficiales de rocas. Se analizaron los siguientes elementos: Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, Ga, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Th, Pb, Au, Ag y Tl por medio de las siguientes técnicas: Fluorescencia de rayos X para la identificación de elementos mayores, traza y metales base y espectrometría de absorción atómica para la determinación de las concentraciones de Au, Ag, y Tl.

La fluorescencia de Rayos X (FRX) como técnica analítica fue introducida en México durante los años 50's, sin embargo fue hasta finales de los 60's que se utilizó para realizar análisis cuantitativos de rocas en forma sistemática empleando muestras de referencia. Varias dependencias, entre ellas El Consejo de Recursos Minerales y La Comisión de Fomento Minero adquirieron sistemas de FRX y aplicaron la técnica para el análisis de elementos mayores y traza en rocas. El Instituto de Geología de la UNAM adquirió un equipo de FRX *Philips* en 1976, el cual fue calibrado en 1981 para el análisis de elementos mayores y trazas.

Durante el proceso de análisis de las muestras de éste trabajo se emplearon Muestras Internacionales de Referencia Geoquímica (MIRG) en la elaboración de curvas de calibración. Recientemente el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), ha adquirido un equipo secuencial de *FRX Siemens SRS 3000* que es uno de los más modernos de México, éste aparato está conectado a un sistema de computadoras para un análisis más dinámico.

La preparación para analizar elementos mayores consistió en la fusión de 0.8 g de muestra molida y 7.2 g de fundente constituido por  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  y  $\text{LiBO}_2$  granular, grado ultrapuro en relación 1:1, La fusión se llevó a cabo en crisoles fabricados de una aleación Pt : Au (95:5), mediante un procedimiento programado que controla el calentamiento y fusión de la mezcla durante 10 minutos. Después de este periodo, el aparato derrama la mezcla fundida en pequeños recipientes para que al enfriarse y endurecerse, forme pastillas de vidrio de 3.5 cm de diámetro por 3 mm de espesor, listas para su medición

Para la determinación de la concentración de elementos traza, las muestras fueron sometidas a una preparación diferente; cada una de las muestras de roca fue reducida a polvo en el equipo de molienda *HERZOG* del instituto de Geología de la U.N.A.M, teniendo especial cuidado en limpiar lo mejor posible los anillos vibratorios concéntricos del equipo, para evitar la posibilidad de contaminar la muestra siguiente con la anterior. Se trituraron aproximadamente 20 g de muestra durante 15 segundos con ayuda de los reguladores de operación de dicho equipo. Una vez molidas, fueron pesadas en una balanza analítica *SARTORIUS* para obtener 4 gramos. Posteriormente las muestras fueron maceradas una por una en un mortero de ágata y mezcladas con 0.4 g del aglutinante *Wax-C* micropolvo de Hoeschts.

Una vez realizada la mezcla fue vaciada en un cilindro de acero, apisonándose la mezcla manualmente, se colocó una tapa para la homogeneización de la presión y se le introdujo un émbolo de diámetro exterior igual al diámetro interior del cilindro (a modo de pistón).

El mecanismo cilindro-émbolo fue introducido en una prensa hidráulica *GRASEBY-SPECAC*, que tiene la capacidad de ser programada para aplicar diferentes presiones en diferentes tiempos. Las muestras de La Primavera fueron sometidas a una presión de 30 toneladas durante 30 segundos (condiciones como estas son recomendadas en Lozano Sta-Cruz (1996) a modo de optimizar los resultados). Pasado este tiempo el mecanismo es extraído de la prensa, se retira el émbolo liberando la muestra, la cual adquiere una forma de pastilla de 3.5 cm de diámetro por 3 mm de espesor. Las dimensiones son similares a las muestras fundidas por efectos de construcción del sistema secuencial.

Las muestras ya sean fundidas ó prensadas (nunca combinadas) son colocadas en grupos de 10 en los depósitos del espectrómetro, durante 20 minutos para elementos mayores y 65 minutos para elementos traza (Lozano Sta Cruz, 1999 comunicación personal). La determinación de los datos correspondientes a muestras fundidas y prensadas se realizó, como ya se ha comentado, en el espectrómetro secuencial de FRX marca *Siemens SRS 3000*.

Por otra parte, el proceso para obtener concentraciones de metales preciosos requirió de 0.2g de muestra pulverizada (usando el procedimiento de pulverización y maceración anteriormente descrito). Cada una de las muestras molidas fue digerida en la siguiente solución:

8 ml de HCl + 4 ml de HF + 4 ml de HNO<sub>3</sub> + 4 ml de H<sub>2</sub>O destilada

Posteriormente, las muestras fueron introducidas, en grupos de 14, en un horno de microondas M.A.R.S.-5 (Microwave Acelerator Reaction Sistem) durante 25 minutos, a 600 Watts de potencia y 200°C de temperatura. Una vez digeridas y enfriadas, las concentraciones de Au, Ag y Tl se midieron en un espectrómetro de Absorción Atómica *PERKIN-ELMER*, en el Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM. Se analizaron 254 muestras leyéndose 18 elementos por muestra para un total de 4572 datos.

## PROCESAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS.

Una vez leídas las concentraciones de los elementos, se procedió a formar una base de datos con las mismas, capturándolas en la hoja de trabajo (worksheet) del paquete *SURFER 6* y con estos datos se realizaron secciones de curvas de isovalores para cada uno de los elementos analizados.

Básicamente, el paquete *SURFER 6* posicionó los datos geoquímicos accesados, dentro de una rejilla rectangular de 36 columnas X 50 renglones. En ésta rejilla a manera de plano coordenado, el origen puede ser colocado en el lugar que más convenga. Por razones del funcionamiento del software usado, se consideró al ángulo superior izquierdo como el origen, con nodos cada 100 m. Los lados correspondientes al eje Y representaron la profundidad (desde la superficie=0 m y hasta 2900 m), y en el eje X la distancia horizontal entre los pozos muestreados (partiendo del origen y hasta 2100 m). Esta rejilla se utilizó para ubicar a las muestras espacialmente en cuanto a profundidad y distancia entre ellas, la concentración de cada elemento se representó como el valor del eje Z en un sistema coordenado de tres dimensiones, realizándose una rejilla para cada uno de los elementos analizados. Las dimensiones de la rejilla fueron expresadas en metros, con una coincidencia de uno a uno, con las dimensiones de la sección geológica A-A' (Figura 4), que muestra la litología de la zona a profundidad así como la distribución de algunos pozos (Figura 9).

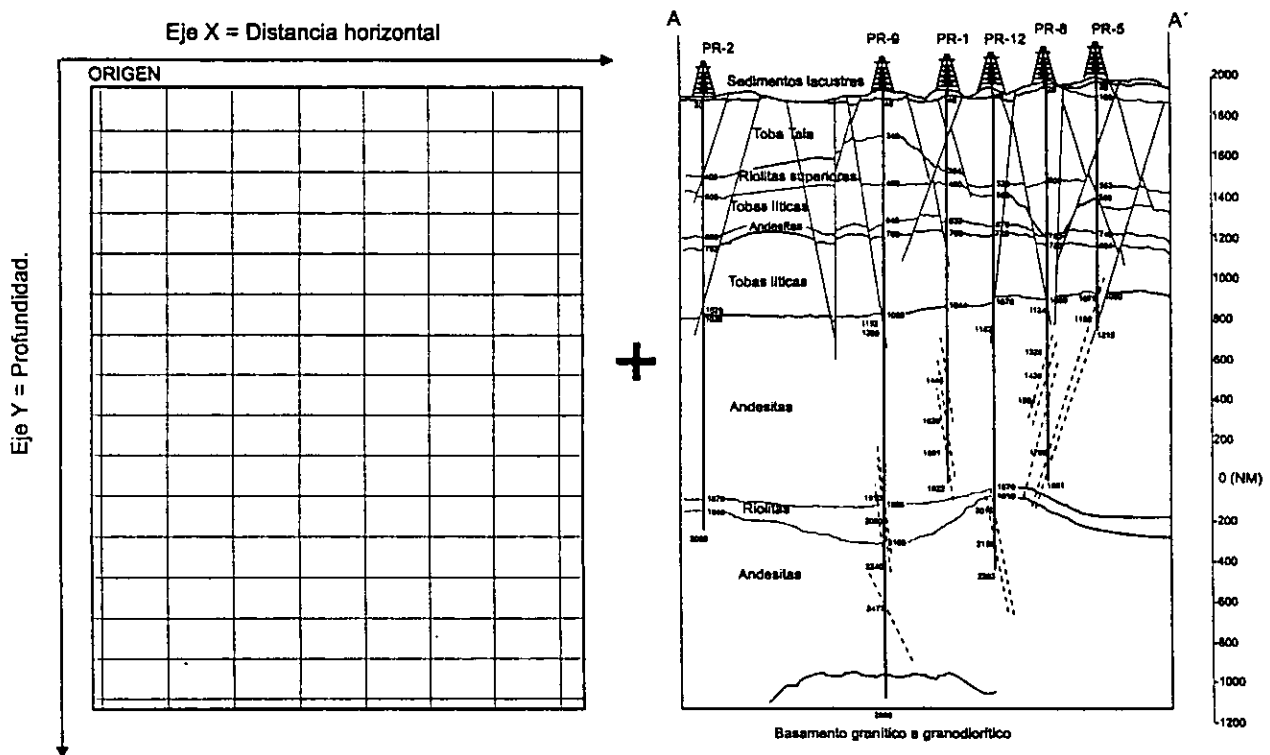


Figura 9. Esquema de la rejilla generada por *SURFER 6*, donde se ubicaron los valores de las muestras y sección geológica A-A'. Nótese la similitud en las dimensiones de ambas (NM=Nivel del mar).

Cuando se tuvieron las muestras ubicadas dentro de la rejilla, se usó una de las herramientas de *SURFER 6* que permite la realización de mapas de contornos interpolando los valores introducidos por medio del método Kriging de interpolación. De esta manera se generaron secciones de isovalores aunadas a sus respectivas escalas de colores para una más fácil identificación de las zonas donde se encuentran las concentraciones más altas (zonas amarillas) y las más bajas (zonas azules) (figuras 10 y 11).

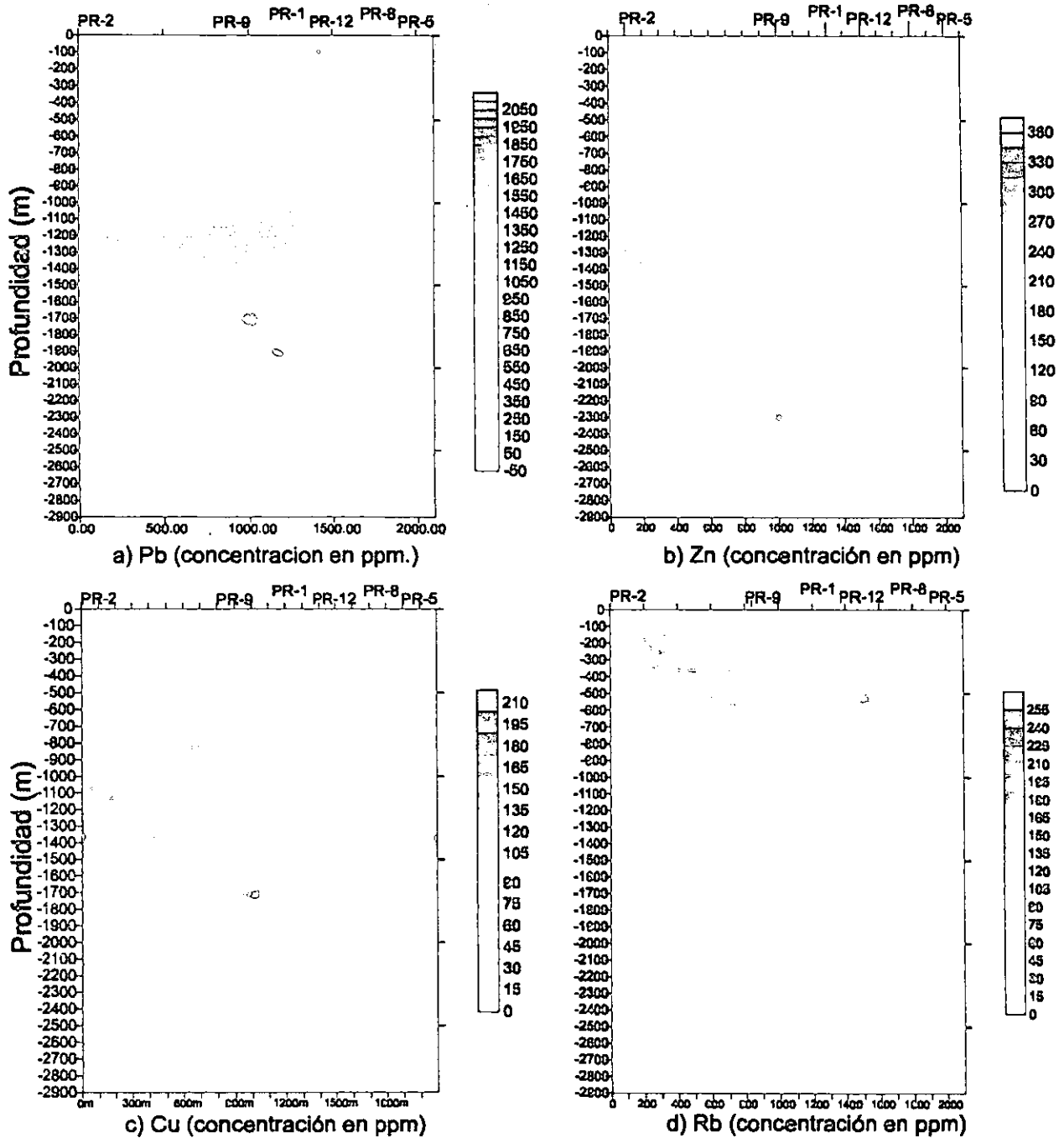


Figura 10.-Sección de isovalores y escala de colores de a) Pb, b) Zn, c) Cu y d) Rb.

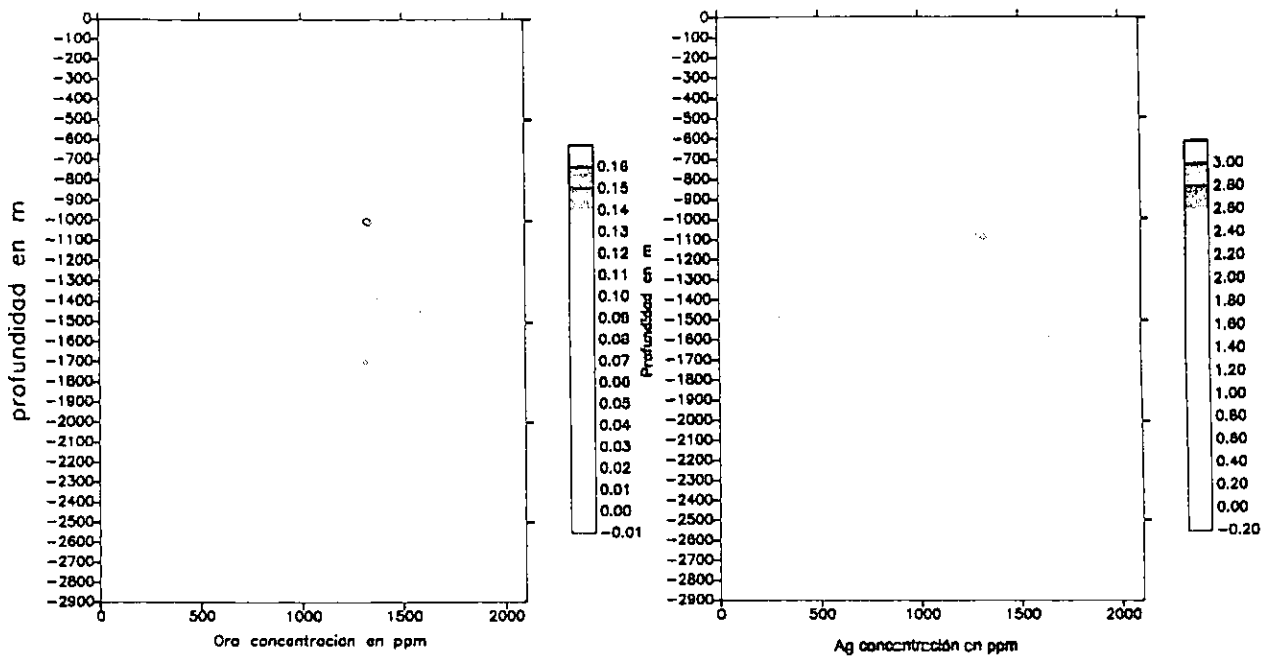


Figura 11.-Sección de isovalores y escala de colores de Au y Ag.

Un análisis de correlación visual, puede hablarnos de la distribución de cada uno de los elementos en particular, pero demeritará en mucho las conclusiones a las que podamos llegar con estas bases, ésta es una de las razones por las cuales se decidió usar un método multivariado para poder conjuntar a todos elementos al mismo tiempo y con base en los resultados obtenidos tratar de entender su comportamiento.

Para el análisis de población de datos, el paquete *IDRISI FOR WINDOWS* (Eastman, 1997) posee las herramientas para obtener parámetros estadísticos tradicionales como la media, la varianza y la desviación estándar, así como la realización del Análisis por Componentes Principales (el cual describiremos posteriormente). En el área de Geografía se han desarrollado una serie de rutinas especializadas para la descripción estadística de datos espaciales y encuentran su aplicación en trabajos como éste.

Las secciones de isovalores realizadas en *SURFER 6*, para cada uno de los elementos analizados, fueron exportadas al paquete *IDRISI FOR WINDOWS*, gracias a la compatibilidad entre ambas herramientas. Finalmente se generaron las imágenes correspondientes a los Componentes Principales (Figuras 13, 14, 15 y 16)

Para el paquete *IDRISI FOR WINDOWS* el análisis por componentes principales, es una técnica matemática relacionada con un factor de correlación, que transforma un conjunto de imágenes preexistentes, en un conjunto de nuevas imágenes llamadas componentes (Figura 12), de tal modo, que las nuevas imágenes no tienen correlación entre sí y están ordenadas de forma descendente en términos de la cantidad de información que cada imagen pueda explicar (Eastman, 1997).



En otras palabras y para este trabajo, la primera imagen generada por el paquete (COMPONENTE 1) (Figura 13), representará un gran porcentaje de información acerca del comportamiento del sistema hidrotermal ya que es la que contiene la mayor varianza.

La segunda (COMPONENTE 2) (Figura 13), representará un porcentaje menor y así sucesivamente, de tal modo que las últimas imágenes generadas, representarán datos redundantes ó que no aportan información acerca del comportamiento del fenómeno en cuestión (como veremos más adelante).

## CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS Y PETROGRÁFICAS DE LAS ROCAS DEL YACIMIENTO.

Todas las unidades aflorantes en la caldera de La Primavera son riolitas ligeramente peralcalinas (>75% SiO<sub>2</sub> en una base anhidra), conteniendo más del 15% de cristales de sanidino ≥ cuarzo >> ferrohedenbergita > fayalita +-titanomagnetita

Aunque todas las unidades eruptivas son similares en el contenido de elementos mayores, se encuentran diferencias químicas sistemáticas correlacionables con su edad y modo eruptivo. Aunque las variaciones en elementos mayores son pequeñas, las variaciones de los elementos traza que mucho mayores.

Con base en los análisis por fluorescencia de rayos X para Rb, Sr, Y, Zr y Sc de 150 muestras de lava, flujos de ceniza y tefras de caída libre de La Primavera, sumados a los análisis de microsonda electrónica de fenocristales y a los análisis químicos húmedos de algunas muestras (Mahood, 1981b) se pueden hacer las siguientes observaciones.

Las lavas Precaldera (Figura 5) son composicionalmente el grupo más heterogéneo. Las tres unidades de la parte norte no muestran una variación química sistemática con el tiempo (Mahood, 1981a). Las lavas Precaldera no son idénticas, como lo muestran El Alto y El Nejahuete que son domos compuestos, formados por la erupción de lavas de diferentes composiciones.

Los domos de Anillos Antiguos (Figura 5) son químicamente homogéneos y virtualmente idénticos. Las composiciones de los domos de anillo más jóvenes varían ligeramente. Las lavas de arco sur son homogéneas y similares

Las rocas pumicítica y lapilli pumicítico de la Toba Tala han sido hidratadas (debido a su fracturamiento secundario) en un grado significativo y como resultado tienen aproximadamente 0.3% en peso menos de Na<sub>2</sub>O, 0.2% en peso más de K<sub>2</sub>O y relaciones más altas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO que las obsidianas densas de los grupos eruptivos correspondientes (Mahood, 1981b).

La Toba Tala se encuentra ligeramente zoneada en su composición, varía desde peralcalina (Al < (Na+K)) en el inicio de la erupción, enriquecida en Na, Rb, Cs, Cl, F, Zn, Y Zr, Nb, Sb, elementos de tierras raras pesadas, Hf, Ta, Pb, Th y U, a una parte metalumínica al final de ésta, enriquecida en K, tierras raras ligeras, Sc y Ti (Mahood, 1981b).

Los valores de CaO varían de 0.14% a 0.25% y muestran poca correlación con la posición estratigráfica de la toba Tala (Mahood, 1981b). La alúmina permanece aproximadamente constante a través del volumen extravasado pero el sílice puede tener concentraciones menores en la porción extravasada al principio de este evento explosivo (Mahood, 1981b).

## CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN LAS ROCAS.

En el campo geotérmico de La Primavera se analizaron las concentraciones de algunos elementos. Entre los elementos metálicos y trazas detectados están: Zn, Cu, Ni, Pb, Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, Ga, V, Cr, Co, Au, Ag y Tl (Alcalá Montiel et al., en preparación), (Tablas I, II, III y IV).

JICA (1989) llevó a cabo un estudio de concentración de mercurio en los suelos, encontrando concentraciones de más de 70 ppb asociadas a las principales fracturas, pero sin especificar si el mercurio se encuentra en minerales o nativo.

Tabla I. Concentraciones en ppm de algunos metales y elementos traza para las muestras del pozo geotérmico PR 1 (Figura 4) obtenidas por XRF para este trabajo.

POZO PR-1	Prof. (m)	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	Ga	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn
Muestra:														
PR 10	10	169	61	198	74	593	59	31	20	10	5	31	26	178
PR 100	100	201	5	22	22	387	58	30	1	16	1	29	5	142
PR 168	158	21	163	15	17	19	538	406	194	130	33	66	28	92
PR 192	192	69	476	137	30	189	5	28	5	67	4	12	21	141
PR 300	300	219	23	7	34	445	70	34	4	46	2	37	10	182
PR 378	378	32	385	37	24	99	149	482	57	80	6	16	19	64
PR 400	400	93	556	101	30	221	13	24	6	34	6	13	14	125
PR 527	527	21	244	12	21	27	1016	570	137	89	21	40	29	96
PR 644	644	42	370	43	23	76	453	906	57	54	8	0	3	123
PR 810	810	128	206	577	29	219	27	19	31	38	6	14	14	59
PR 910	910	34	451	27	20	114	276	1114	7	2	24	8	10	105
PR 1016	1016	140	61	200	49	605	36	27	14	31	3	31	22	110
PR 1056	1056	24	1099	602	13	198	8	20	123	69	21	42	28	66
PR 1210	1210	54	692	590	18	198	5	18	105	37	19	30	44	75
PR 1500	1500	18	701	497	15	165	10	18	165	115	25	44	23	81
PR 1730	1730	18	552	430	12	144	8	14	210	277	30	89	20	69
PR 1800	1800	21	588	364	20	171	8	15	190	362	35	91	31	78

Tabla II. Concentraciones en ppm de algunos elementos traza para las muestras del pozo geotérmico PR-8 (Figura 4), obtenidas por XRF para este trabajo.

POZO PR-8	Prof. (m)	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	Co	V	Cr	Ca	Fe	Cd	Zn	Pb
Muestra															
PR-8-20	20	150	68	119	48	542	49	28	12	44	0	7	19	192	268
PR-8-40	40	142	51	41	49	533	49	25	9	25	2	9	12	146	57
PR-8-100	100	124	284	2206	14	315	53	19	9	11	2	7	n.d.	97	21
PR-8-200	200	151	75	10	43	344	54	25	14	25	3	11	3	130	27
PR-8-300	300	154	56	168	24	344	63	21	13	18	2	16	n.d.	108	25
PR-8-400	400	37	207	286	0	88	26	5	51	11	1	0	n.d.	87	30
PR-8-500	500	29	1134	10108	0	113	24	4	39	20	4	3	n.d.	65	4
PR-8-560	560	113	280	2075	2	266	61	16	24	19	3	13	n.d.	133	24
PR-8-590	590	72	180	491	0	140	45	9	43	27	5	10	n.d.	88	20
PR-8-700	700	207	26	138	85	392	79	31	4	56	0	8	11	111	36
PR-8-800	800	140	51	15	16	315	55	21	19	24	2	12	n.d.	128	25
PR-8-900	900	187	23	5	57	434	76	28	0	18	1	15	4	134	27
PR-8-990	990	194	59	20	76	677	82	27	9	25	2	26	n.d.	181	32
PR-8-1100	1100	27	139	193	120	701	120	32	26	28	3	22	19	207	33
PR-8-1200	1200	182	15	67	61	364	80	29	0	44	2	16	4	138	27
PR-8-1500	1500	2	417	241	0	67	5	4	96	218	13	11	n.d.	64	35
PR-8-1750	1750	15	598	438	16	167	10	16	207	208	33	83	35	78	34
PR-8-1850	1850	18	509	322	3	99	7	8	150	226	25	66	37	101	108

Tabla III. Concentraciones en ppm de algunos metales y elementos traza para las muestras del pozo geotérmico PR -12 (Figura 9) obtenidas por XRF para este trabajo.

Pozo PR-12	Muestra	Al	Si	B	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	Co	Cd	
	PR-30	30	147	26	48	54	583	62	26	5	5	29	5	16	137
	PR-40	40	164	23	28	38	407	65	25	10	19	1	15	2	154
	PR-60	60	153	17	10	37	391	59	23	6	30	1	18	0	108
	PR-100	100	153	70	33	53	445	59	25	17	11	12	8	12	111
	PR-190	190	199	14	13	79	438	61	32	3	23	1	9	17	152
	PR-250	250	192	11	4	73	470	70	27	7	0	24	10	13	136
	PR-310	310	238	12	32	115	539	79	36	4	26	3	11	21	150
	PR-410	410	179	38	40	55	429	77	28	10	30	1	16	8	146
	PR-500	500	232	15	49	103	616	107	30	2	12	24	12	79	258
	PR-530	530	268	10	20	162	1330	171	34	6	37	14	18	10	217
	PR-550	550	255	12	39	118	959	136	33	9	29	28	15	19	243
	PR-560	560	232	23	51	116	944	114	38	2	49	2	25	13	231
	PR-600	600	148	232	536	53	352	56	23	44	59	6	19	14	122
	PR-640	640	212	149	308	124	274	107	27	49	53	13	22	16	157
	PR-690	690	58	495	1027	37	417	38	21	69	11	33	0	0	233
	PR-700	700	40	484	1308	29	298	40	59	281	32	55	32	23	278
	PR-750	750	146	267	492	57	558	69	25	60	55	7	13	15	157
	PR-900	900	60	351	459	12	251	31	16	23	68	5	13	0	63
	PR-1000	1000	87	436	1398	32	276	20	21	28	118	8	7	18	78
	PR-1100	1100	24	658	611	18	183	11	16	195	195	25	27	45	75
	PR-1200	1200	31	692	606	20	207	15	18	211	119	28	30	45	89
	PR-1300	1300	33	630	576	23	218	15	17	170	254	24	32	22	77
	PR-1500	1500	22	611	426	23	207	14	18	212	290	32	50	45	90
	PR-1700	1700	22	506	419	13	146	8	14	181	298	36	98	19	69
	PR-1840	1840	16	580	374	11	140	7	12	191	375	33	102	12	72
	PR-1880	1880	131	81	133	46	533	17	21	19	110	3	17	12	57
	PR-1900	1900	71	339	94	55	656	25	20	23	125	5	22	27	109
	PR-2010	2010	49	792	1200	20	185	7	19	116	160	36	40	23	60
	PR-2100	2100	41	128	180	21	96	5	19	216	261	17	36	40	90
	PR-2150	2150	75	345	729	25	204	7	18	200	380	20	61	86	99
	PR-2200	2200	133	298	718	28	186	7	18	199	137	24	60	58	146
	PR-2303	2303	95	361	1154	23	101	4	17	223	393	29	172	10	121

En algunos manantiales calientes y pozos geotérmicos alrededor del mundo, se tiene precipitación de minerales como galena, esfalerita y calcopirita en niveles profundos, además de sulfosales ricas en Au, Ag, Tl y Hg a la salida de manantiales y pozos.

En el caso de La Primavera se detectaron concentraciones de hasta 200 ppb de Au y 50 ppb de Ag en depósitos superficiales en salidas de fumarolas, además de concentraciones de otros metales en las rocas que integran la columna litológica del campo.

Tabla IV. Concentraciones en ppm de Au, Ag y Tl obtenidas por Absorción Atómica, de las muestras de roca, de algunos pozos de La Primavera (n.d. = no detectado).

Profundidad (m)	Au	Ag	Tl
<b>POZO P1</b>			
100	n.d.	0,0200	0,0100
400	0,1000	0,0200	n.d.
605	0,0120	0,0148	0,0039
1000	n.d.	1,5700	0,0300
1190	n.d.	0,0400	0,0400
1400	0,0100	0,0400	n.d.
1700	0,0200	0,0800	0,0700
1900	0,0200	0,0400	0,0300
2000	n.d.	0,0800	n.d.
2200	0,0300	0,0300	0,0300
2400	n.d.	0,0900	0,0200
2055	0,0160	0,0302	0,0038
2060	0,0080	n.d.	0,0010
2070	0,0070	0,0283	n.d.
2790	0,0129	0,0308	0,0052
2820	0,0138	0,0308	0,0058
2830	0,0181	0,0341	0,0072
2985	0,0178	0,0351	0,0054
<b>POZO P2</b>			
140	0,0050	0,0028	n.d.
198	n.d.	0,0028	n.d.
242	0,0040	0,0285	n.d.
370	0,0089	0,0031	0,0011
380	0,0011	0,0031	0,0025
734	0,0040	0,0280	0,0048
950	0,0060	0,0031	n.d.
1050	0,0283	0,0283	0,0041
1200	0,0121	0,0285	0,0069
1260	0,0159	0,0309	0,0122
1598	0,0141	0,0284	0,0074
1900	0,0164	0,0323	0,0064
<b>POZO RR</b>			
378	0,0010	0,0031	0,0016
400	0,0110	0,0169	0,0036
527	0,0119	0,0280	0,0078
644	0,0123	0,0166	0,0036
910	0,0187	0,0289	0,0070
1016	0,2100	0,0300	0,0300
1056	n.d.	3,7200	0,0600
1500	0,0800	0,0300	0,0600
1583	0,0217	0,0294	0,0094
1730	0,0200	0,0300	0,0300

Profundidad (m)	Au	Ag	Tl
<b>POZO P3</b>			
30	0,0070	0,0310	n.d.
100	0,0109	0,0335	0,0055
250	0,0049	0,0031	n.d.
500	0,0020	0,0312	0,0017
530	0,0020	0,0338	n.d.
550	0,0070	0,0312	n.d.
570	0,0099	0,0281	n.d.
600	0,0030	0,0280	0,0013
640	0,0116	0,0143	0,0036
880	0,0138	0,0338	0,0028
770	0,0150	0,0382	0,0110
1100	0,0300	0,0200	n.d.
1200	n.d.	0,0400	0,0500
1300	n.d.	0,1300	0,0800
1880	0,0170	0,0230	0,0049
1900	0,0079	0,0309	0,0012
2010	0,0110	0,0383	0,0081
2100	0,0169	0,0338	0,0098
2150	0,0150	0,0364	0,0095
2200	0,0140	0,0311	0,1001
2303	0,0219	0,0481	0,0070
<b>POZO P4</b>			
20	n.d.	0,0800	n.d.
100	0,0309	0,0500	0,0700
400	0,0800	0,3040	0,0600
900	n.d.	0,0800	0,0300
1200	n.d.	0,0200	0,0500
1750	n.d.	0,0700	0,0700
1850	0,0600	0,0900	n.d.
1120	0,0120	0,0310	0,0002
<b>POZO P5</b>			
30	n.d.	0,0800	0,0500
120	0,0200	0,0500	n.d.
200	0,0090	0,0015	0,0029
220	n.d.	0,0800	0,0700
242	0,0040	0,0029	n.d.
400	n.d.	0,0800	0,0200
510	n.d.	0,0700	0,0700
570	0,0600	0,0300	0,0300
710	n.d.	0,0700	0,0100
750	n.d.	0,0800	0,0300
800	0,0500	0,0400	0,0300
900	n.d.	0,0400	0,0200
1150	n.d.	0,0500	0,0400

Hasta el momento, solamente se ha localizado un depósito de *sinter* a la salida de manantiales cerca del arroyo Agua Brava. Uno de sus manantiales tiene los valores más altos de oro medidos en las aguas de La Primavera, con una concentración de 63 ppb (Cruz Casas, 1998).

Los resultados de difracción de rayos X para el *sínter* antes mencionado, indicaron que está constituido principalmente de SiO<sub>2</sub>. Las concentraciones (% en peso) de sus principales constituyentes son los siguientes:

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	O
92.7	0.389	0.178	0.336	2.180	2.890	0.424	0	0.04

Sin embargo, no se han hecho análisis para oro hasta el momento en este depósito.

La precipitación de metales a partir de soluciones hidrotermales, tiene lugar donde los iones complejos, que transportan a los metales, se desestabilizan y como resultado, la solubilidad de los metales en cuestión se reduce drásticamente. Los factores que propician esta desestabilización pueden ser:

- (1) Decremento en la temperatura.
- (2) Pérdida de presión en el sistema y/o ebullición, siendo la ebullición una de las principales causas del decremento en la temperatura. El CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> entre otros, cambian de su estado en solución a la fase de vapor, emigrando a la superficie y manifestándose en forma de fumarolas.
- (3) Cambios en las condiciones redox de las soluciones, que pueden ser causados por dilución con aguas frías meteóricas infiltradas. La liberación del CO<sub>2</sub>, causa una elevación del pH en la solución remanente, por otro lado, la salinidad se incrementa como resultado de la pérdida de vapor de agua.

### ALTERACIÓN HIDROTERMAL.

La alteración hidrotermal es un proceso que involucra cambios químicos, mineralógicos y texturales, resultado de la interacción de fluidos acuosos calientes con las rocas a través de las cuales circulan, involucrando condiciones físico-químicas específicas,

En el caso de la solidificación de un cuerpo magmático, la exsolución de gas y fases acuosas, pero también agua meteórica calentada, dan lugar a soluciones hidrotermales, las cuales actúan en las rocas circundantes produciendo los cambios antes mencionados, debidos al desequilibrio causado en gran parte por la presencia de H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> y otros volátiles tales como B, CO<sub>2</sub>, y F. (Pirajno, 1992).

En esencia los fluidos hidrotermales atacan químicamente a los minerales que constituyen a la roca encajonante, la cual tiende a re-equilibrarse, formando nuevas asociaciones, las cuales están en equilibrio con las nuevas condiciones físico-químicas (Pirajno, 1992).

La periferia de un sistema hidrotermal es afectada por la condensación de gases (especialmente  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) en las zonas de recarga de aguas frías meteóricas, en fracturas abiertas arriba de la superficie del agua en ebullición donde la oxidación atmosférica del  $\text{H}_2\text{S}$  produce ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (White, 1957).

Dicha periferia incluye varios tipos de aguas, desde muy ácidas a moderadamente ácidas, con su correspondiente alteración argílica, argílica avanzada, hasta neutrales y/o alcalinas generando alteración propilítica. Algunas aguas de la periferia están cargadas con  $\text{CO}_2$ , que al perderlo, deposita calcita y siderita, en la periferia de la alteración y como relleno de fracturas.

Para el caso de La Primavera se realizaron análisis de petrografía para la identificación de minerales de alteración y así establecer la intensidad de la alteración con la profundidad (Hernández, 1996). Estos estudios incluyeron además, análisis por difracción de rayos X para la identificación de minerales arcillosos.

Para La Primavera, examinando en superficies pulidas, se identificó pirita, a lo largo de las rocas que integran el acuífero profundo (Vulcanitas Cordilleranas), presentándose en cristales euedrales de hasta 2 mm. En superficie pulida la pirita es uno de los minerales metálicos más comunes además de haberse identificado esfalerita y galena, en el mismo tipo de rocas.

Los minerales hidrotermales identificados en láminas delgadas incluyeron cuarzo, tridimita, adularia, calcita, epidota, clorita, sericita, pirita, hematita y calcopirita (Hernández, 1996).

Estudios realizados por la CFE reportaron minerales de alteración tales como hematita y zeolitas. La epidota se reportó en cantidades significativas en el pozo PR 2, en la zona asociada al cruce con la falla La Azufrera. Los demás minerales aparecieron en casi todos los pozos (JICA, 1989).

En la Primavera, tanto los minerales indicativos de baja temperatura (el grupo de Zeolitas) como los de temperaturas moderadas (pirita) se profundizan en dirección al borde occidental de la caldera. Esto puede indicar que hacia esta zona, la fuente de calor y el yacimiento están más alejados. También el cuarzo y la calcita presentan esta tendencia.

En los pozos del centro de la caldera, la mineralogía secundaria, es indicativa de temperaturas relativamente moderadas (no más altas de  $250^\circ\text{C}$ ) Con la información obtenida, aunada a los resultados del reporte de JICA (1989), se estableció un perfil de alteración vs profundidad (Figura 12), el cual presentó similitud con el modelo propuesto por Silberman y Berger (1985).

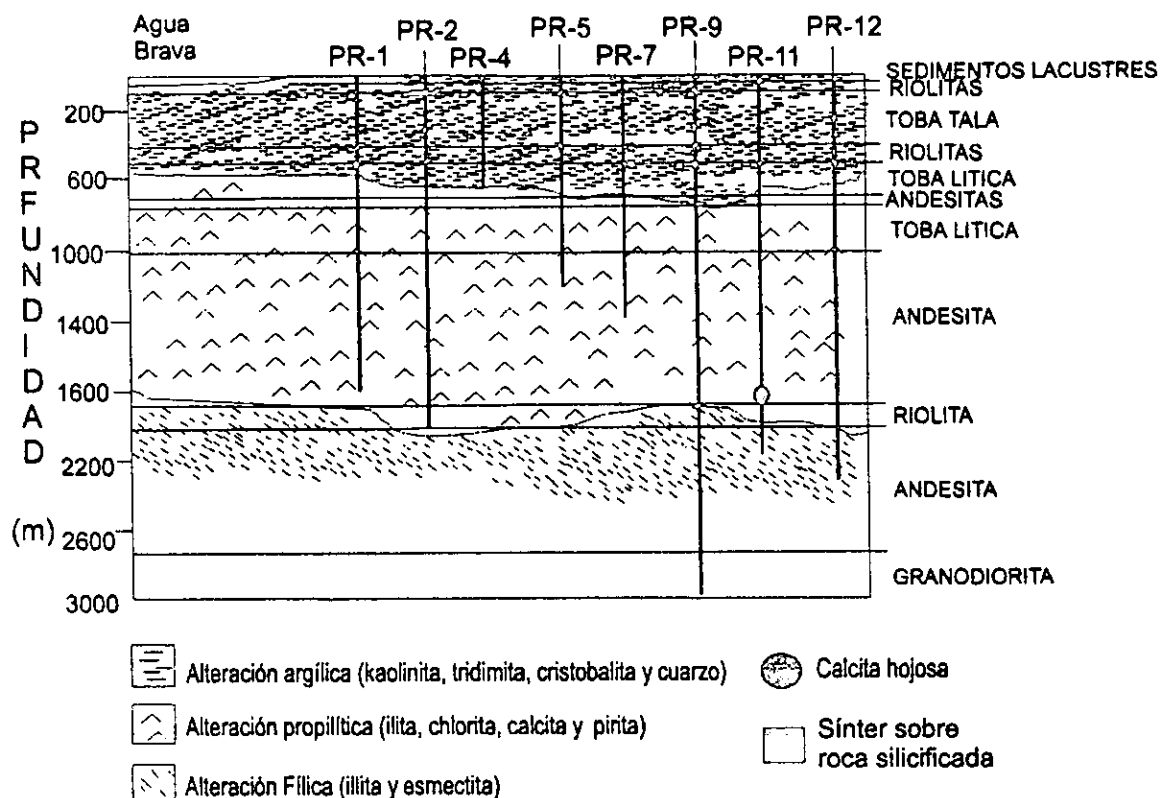


Figura 12. Sección esquemática que muestra el perfil de alteración en el subsuelo de La Primavera.

En síntesis, las asociaciones mineralógicas identificadas en los pozos de La Primavera, son características de regímenes geotérmicos activos como los de Cerro Prieto, B.C., Los Azufres, Mich., Los Humeros, Pue., y otras partes del mundo.

El estudio de los sistemas de manantiales calientes, su química, precipitados y productos de alteración proveen un laboratorio natural para estudiar los procesos y mecanismos involucrados en la formación de yacimientos minerales.



## CAPITULO V: ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO.

### ANÁLISIS MULTIVARIADO

El estudio del campo multivariado puede utilizarse con diferentes enfoques, y depende del objetivo del análisis y de las situaciones que se presentan durante la toma de datos. Una de las metas principales de un análisis multivariado es encontrar una representación simplificada de un fenómeno de estudio (Kendall, 1999).

La unidad experimental puede ser un individuo, una finca, una parcela de experimentación, una porción de terreno o como en nuestro estudio, un conjunto de datos que representan la concentración de determinados elementos químicos en muestras de roca espacialmente dispuestas, las características serán una serie de atributos, mediciones, evaluaciones, estimaciones etc.

Los métodos estadísticos multivariados se pueden clasificar en dos tipos: los que permiten extraer información acerca de la interdependencia entre las variables que caracterizan a cada uno de los individuos y los que permiten extraer información acerca de la dependencia de una (o varias) variable(s) con otra(s).

Entre los métodos de análisis multivariado para detectar la interdependencia entre variables se incluyen, el análisis por conglomerados, el análisis por correlación canónica, el análisis de ordenamiento multidimensional, el Análisis por Componentes Principales (ACP) y algunos métodos no paramétricos.

Para la elaboración de este trabajo se utilizó el análisis por componentes principales (ACP), uno de los más difundidos entre las técnicas multivariadas.

Este método (como veremos más adelante), permite la estructuración de un conjunto de datos multivariados obtenidos de una población. Puede encontrarse significación estadística en los componentes, pues es posible asociar a cada uno de ellos con una medida de confiabilidad.

Esto puede lograrse mediante la combinación lineal de un conjunto de variables interdependientes en un conjunto de menor dimensión, es decir haciendo una reestructuración de la información creando un número mínimo de variables que son combinaciones lineales de las variables originales.

Este tipo de análisis nos permite ubicar las observaciones hechas dentro de grupos de datos y agrupar variables con características comunes, de tal forma que las nuevas variables contienen la misma cantidad de información (Pla, 1986).

El objetivo es analizar la interdependencia de las variables la cual puede abarcar desde la independencia total hasta la colinealidad, cuando una de ellas es combinación lineal de las otras.

Para ello se seleccionan del conjunto ciertas variables (una o más) y se estudia su dependencia de las restantes, como en el análisis de regresión múltiple.

A partir de un conjunto de datos es posible encontrar modelos que permitan formular hipótesis en función de parámetros estimables (parámetros de dispersión y de tendencia central).

En el caso de poblaciones de datos univariados casi siempre es posible caracterizar la distribución de probabilidades a partir de la media y la varianza. Sin embargo para el caso multivariado en que se estudia una población con  $p$  variables es decir, un conjunto de datos donde se han observado ó medido características ó propiedades se dispondrá entonces, de  $p$  medias,  $p$  varianzas y  $(1/2)p(p-1)$  covarianzas (Pla, 1986) lo cual no es difícil de obtener con los paquetes computacionales *SURFER 6* e *IDRISI FOR WINDOWS* utilizados en este trabajo.

Cada fenómeno de estudio, requiere de una evaluación particular para utilizar el método multivariado más adecuado que permita extraer la máxima información posible del conjunto de datos, pero que a su vez, garantice su aplicabilidad. Las técnicas multivariadas son muy potentes y pueden auxiliar al investigador a encontrar una justificación que no se sustente necesariamente en el análisis del objetivo de la información recopilada.

Para la mente humana es tradicional representar al espacio en dos dimensiones o a lo sumo en tres. La noción de un espacio de cuatro, cinco o más dimensiones resulta difícil de comprender. Sin embargo, existen muchas formas de acercarse a estos conceptos y quizás el matricial sea el más adecuado, ya que es la base del análisis estadístico multivariado.

Se dice, que un conjunto de datos constituye una muestra multivariada si cada individuo (muestra de campo, para este trabajo) ha sido extraído al azar de una población y en él se han medido una serie de características.

Se define como una *matriz de datos multivariados* al arreglo de dimensión  $(n \times p)$ :

$$X = (x_{ij}) = \begin{matrix} & x(11) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & x(1p) \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X = (x_{ij}) = & \cdot & \cdot & \cdot & x(ij) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & x(n1) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & x(np) \end{matrix}$$

Siendo  $x(ij)$  = la observación de la  $j$ -ésima variable en el  $i$ -ésimo individuo.

$x(i)$  = el vector renglón que contiene las observaciones de todas las variables en el  $i$ -ésimo individuo y

$x(j)$  = el vector columna que contiene todas las observaciones de la  $j$ -ésima variable.

A partir de esta matriz (que contiene toda la información de las muestras tomadas), es posible calcular algunas funciones que permitan extraer conclusiones de los datos. En el caso univariado es posible calcular parámetros como la media y la varianza (que en dicho caso están representadas por escalares). Para el caso multivariado la media es un vector y la varianza una matriz.

Entonces, para una matriz de datos como la anterior, se define la MEDIA muestral de la  $j$ -ésima variable como:

$$\bar{x}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(ij)$$

Y el vector promedio formado por los  $\bar{x}(j)$  será:

$$X = \begin{pmatrix} \bar{x}(1) \\ \vdots \\ \bar{x}(j) \\ \vdots \\ \bar{x}(p) \end{pmatrix}$$

Por otra parte, dada una *matriz de datos multivariados*, la VARIANZA muestral de la  $j$ -ésima variable está definida como:

$$s(jj) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(ij) - \bar{x}(j))^2$$

Asimismo, se define la COVARIANZA entre la  $j$ -ésima y la  $k$ -ésima variable como:

$$s(jk) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(ij) - x(j))(x(ik) - x(k))$$

$$j, k = 1, \dots, p$$

La matriz formada por los  $s(jk)$  y los  $s(jj)$  será la MATRIZ DE VARIANZA-COVARIANZA o simplemente matriz de covarianza, representada por la matriz  $S$ .

$$S = \begin{pmatrix} s(11) & \cdot & \cdot & \cdot & s(1p) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & s(jk) & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s(p1) & \cdot & \cdot & \cdot & s(pp) \end{pmatrix}$$

La matriz  $S$  de COVARIANZA es una manera de expresar la DISPERSIÓN de los datos alrededor del vector media.

Sin embargo a veces es necesario disponer de un escalar que sintéticamente esta dispersión, puede conocerse un "número", que exprese la variabilidad multivariada a partir de la información contenida en la matriz  $S$  (más adelante veremos que dicho escalar, en álgebra vectorial es conocido como valor característico).

A partir de los elementos de la matriz  $S$  es posible calcular la matriz  $R$ , de igual dimensión que  $S$  pero cuyos elementos sean los COEFICIENTES DE CORRELACIÓN entre la  $j$ -ésima y la  $k$ -ésima variables:

$$r(jk) = \frac{s(jk)}{\sqrt{s(jj)s(kk)}} = \frac{s(jk)}{s(j)s(k)}$$

Estos coeficientes pueden ser ordenados en una MATRIZ DE CORRELACIÓN muestral, cuya diagonal principal está formada por números uno, simétrica como la matriz de covarianza por ser  $r(jk) = r(kj)$ , entonces tendremos la matriz  $R$ :

$$R = \begin{matrix} & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & r(1p) \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R = & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & r(p1) & \cdot & r(pk) & \cdot & 1 \end{matrix}$$

Más adelante, veremos la aplicación de éstos conceptos, al generar las matrices **R** y **S** a partir de los datos obtenidos para este trabajo

### VECTORES Y VALORES CARACTERÍSTICOS

El ACP se basa en una transformación lineal de las observaciones originales, esto es una transformación lineal de un espacio vectorial **V** del tipo:

$$T: V \rightarrow V \dots \dots \dots (1)$$

Para este tipo de transformaciones lineales, pueden haber algunos vectores del espacio vectorial **V**, que no se modifiquen al aplicar la transformación o cuya modificación consista únicamente en quedar multiplicados por un escalar. Es decir pueden existir vectores tales que:

$$T(v) = \lambda (v) \dots \dots \dots (2)$$

donde  $\lambda$  es un escalar.

Geométricamente si  $V = R^n$ , significa que dichos vectores no cambian de dirección al aplicar la transformación de tipo (1), sino que sólo cambian de tamaño (si  $\lambda \neq 1$ ) o de sentido (si  $\lambda < 0$ )

A éstos vectores se les conoce como "vectores característicos" de la transformación (1), y a las escalares se les conoce como "valores característicos" (o valores y vectores propios o eigenvalores y eigenvectores respectivamente) de la transformación (1).

En un problema de dimensión finita, el proceso para obtener los vectores y valores característicos de una transformación lineal (1), puede resolverse con ayuda de los determinantes y los sistemas de ecuaciones lineales correspondientes mediante el siguiente procedimiento:

Sea **B** una matriz cuadrada de dimensión ( $p \times p$ ) es posible encontrar un escalar  $\lambda$  y un vector **X** de dimensión ( $p \times 1$ ) no nulo tal que:

$$BX = \lambda X \dots\dots\dots (3)$$

Lo que implica

$$BX - \lambda X = 0 \dots\dots\dots (4)$$

Sacando el vector X como factor común a la derecha tenemos que:

$$(B - I\lambda) X = 0 \dots\dots\dots(5)$$

Al determinante de esta matriz se le denomina "ecuación característica" cuyo grado es igual a la dimensión de la matriz B. Las raíces de esta ecuación serán los valores que tome el escalar  $\lambda$ , y que son a su vez los valores característicos de la transformación (1).

La suma algebraica de las soluciones de la ecuación característica es igual a la traza de la diagonal principal de la matriz (5). Esta propiedad de los valores característicos es importante, ya que cuando se calculan los valores característicos a partir de la matriz de VARIANZA-COVARIANZA (matriz S), la suma de los valores característicos es igual a la suma de las varianzas de las variables incluidas en dicha matriz, o sea es la variación total. (La variación total es la traza de la matriz de varianza-covarianza).

## METODO DE ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES (APC).

Este es uno de los métodos de análisis multivariado más difundidos que permite la estructuración de un conjunto de datos multivariados obtenidos de una población cuya distribución de probabilidades no necesita ser conocida.

Se trata de una técnica matemática que se aplica partiendo del supuesto de que la población de datos tiene una distribución multinormal, es decir, todos los datos son "aproximados" a una distribución normal, mediante una transformación angular (Figura 13).

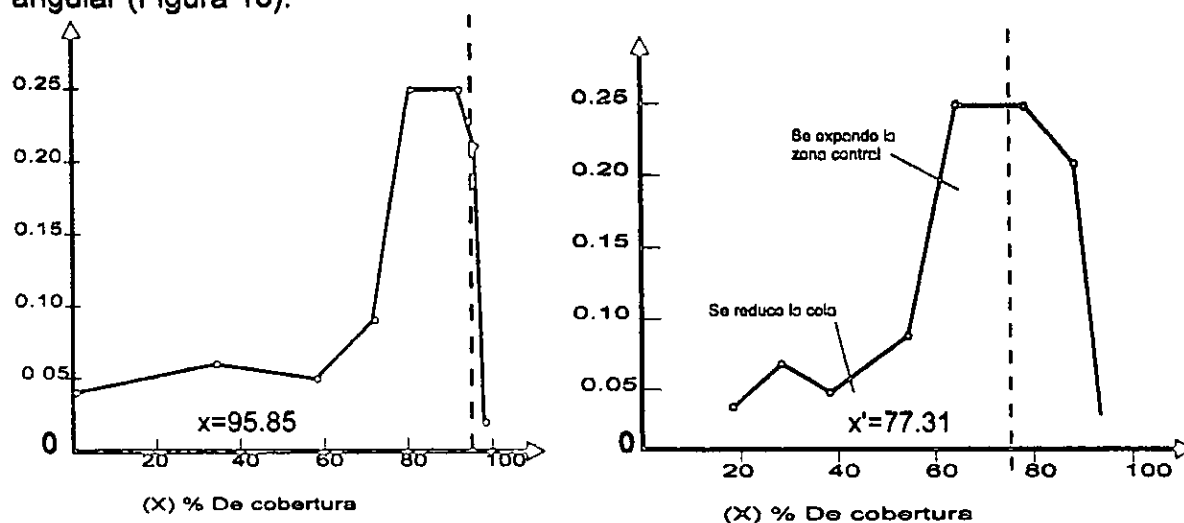


Figura 13. Representación de la distribución de frecuencias para el Zn antes y después de aplicar la transformación angular.

Los objetivos más importantes del Análisis por Componentes Principales son:

- 1) Generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto original de datos.
- 2) Reducir la dimensionalidad del problema estudiado como paso previo para futuros análisis.
- 3) Eliminar algunas de las variables originales si ellas aportan poca información o son redundantes.

Las nuevas variables generadas, se denominan COMPONENTES PRINCIPALES ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ , donde  $n$  = dimensión de la matriz  $X$ ) y poseen algunas características deseables tales como independencia lineal y en todos los casos están no-correlacionadas. El propósito del análisis es interpretar la estructura de los datos dentro de las matrices de VARIANZA - COVARIANZA (matriz  $S$ ) y de CORRELACIÓN (matriz  $R$ ).

característicos de las matrices de correlación o de varianza y su posterior interpretación (Koch & Link, 1980).

Mediante el análisis de los valores característicos, es posible reducir el número de variables que caracterizan a un fenómeno en función de su aportación real a éste para su comprensión.

El problema consiste en determinar las propiedades reales que participan en la configuración de los vectores característicos, ya que cada vector estará formado por aportaciones de cada una de las variables medidas, de las cuales algunas tendrán un peso importante, algunas serán redundantes y las restantes aportarán poca o ninguna información.



## INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

A partir de los datos obtenidos por fluorescencia de rayos X y absorción atómica para este trabajo, el paquete *IDRISI FOR WINDOWS* calculó: La matriz de varianza-covarianza (Tabla V), la matriz de correlación (Tabla VI), la matriz de vectores y valores característicos (Tabla VII) y la matriz de "ejes principales" (Tabla VIII).

### MATRIZ DE VARIANZA - COVARIANZA.

Al estudiar la estructura de las covarianzas de la Tabla V, se advirtió por ejemplo, que el Ni posee valores de covarianza relativamente altos en asociación con el Ba, Co, Cr y Cu, pero no con el Nb, donde el valor de la covarianza es negativo (-64.30), (renglón 6, columnas 1, 2, 3, 4, y 5).

Sin embargo este análisis no es suficiente. Es necesario estudiar el arreglo de la matriz de correlación (Tabla VI), para conocer la magnitud real de éstas relaciones, ya que las varianzas son muy diferentes entre sí, lo que dificulta la interpretación mediante el estudio directo de la matriz de varianza-covarianza (Tabla V).

Si se observan los valores mas altos de las covarianzas en la Tabla V, para los pares de elementos que aparecen en un mismo renglón, se comprueba que son siempre los máximos valores comparando las covarianzas entre cualquiera de los dos elementos y cada uno de los restantes en ese mismo renglón,

Así podemos observar que, el valor de la covarianza entre Ni y Co (Tabla V, renglón 6, columna 2) es de 1858.32, siendo mayor que cualquiera de las covarianzas existentes entre el Ni y los elementos restantes en el mismo renglón, y mayor también que cualquiera de las covarianzas del Co (renglón 2, columna 1) con los demás elementos. Igual situación se presenta si se comparan las covarianzas entre los elementos Ti-Co (954.47), (Tabla V, renglón 12, columna 2).

Hay que recordar que éstos valores absolutos de covarianza NO corresponden necesariamente a los valores mas altos de correlación.

Por ejemplo, si observamos con atención la tabla V, veremos que el valor del coeficiente de correlación entre los elementos Ti y Co es 0.347375 (renglón 12, columna 2) siendo inferior al valor de su covarianza correspondiente (954.47), (Tabla V, renglón 12, columna 2).

### MATRIZ DE CORRELACIÓN.

La Tabla VI, muestran los valores de correlación para los elementos químicos involucrados, Se observó que el valor más alto de correlación se encuentra entre el Ni y el Co (0.921782), (renglón 6, columna 2), seguidos de la asociación Ni-Cr (0.874097) y Pb-Cu (0.8371775).

En los tres casos los valores de correlación son superiores a 0.80. La correlación es alta también entre las parejas; Zn-Rb (0.771011), Cr-Co (0.798842) y Cu-Co (0.744342).

De menor orden pero mayores a 0.50 tenemos a las asociaciones de Ni-Cu, Cu-Ba y Ni-Ba.

La mayor correlación negativa se encuentra entre el Nb y el Cr (-0.196684), (Tabla VI, renglón 5, columna 3).

Le siguen en orden descendente de magnitud negativa las asociaciones (Ti-Nb), (Ti-Rb), (Rb-Cr), (Nb-Ba), (Rb-Ni), (Rb-Co), (Ni-Nb), (Ag-Pb), (Rb-Pb), (Pb-Nb), (Nb-Cu), (Rb-Cu) y (Nb-Co), (Tabla VI).

Una correlación negativa entre un elemento y otro, indica en términos geoquímicos que en rocas con valores altos de concentración de uno de ellos, es baja la concentración del otro.

Dado que los componentes principales, a partir de la matriz de covarianza no constituyen una buena síntesis de las variables en estudio, el análisis, como hemos visto, se efectuó a partir de la matriz de correlación. Esto equivalió a suponer que todos los elementos tienen la misma importancia respecto a la información que suministran para la interpretación del sistema estudiado.

En el caso anterior al trabajar con los valores de covarianza se asignó una ponderación relativa diferente a cada una. Esta relatividad está determinada por el valor de la varianza.

## **MATRIZ DE VECTORES Y VALORES CARACTERÍSTICOS.**

Con base en la matriz de vectores y valores característicos (Tabla VII), se observó que la componente que tiene la mayor cobertura es C1 con 47.85 %, le siguen en orden decreciente C2 con 22.04 %, C3 con 10.20 % y C4 con 6.48 %. Los porcentajes de cobertura de las demás componentes son inferiores al 5%.

Si se examinan los coeficientes en el primer vector propio (eigenvec.1) de la tabla VII se verá que este vector, representa casi exclusivamente al Ba y al Co (Tabla VII, renglón 1, columnas 1 y 2).

El segundo vector propio (eigenvec 2), sintetiza al Ba, Nb y Au, pues posee elevados coeficientes tanto para el Ba como para el Nb y Au.

El tercer vector propio (eigenvec 3), sintetiza el aporte del Cu y en mucho menor grado el Pb. El cuarto vector propio (eigenvec 4), corresponde casi exclusivamente a la Ag.

Para el caso de La Primavera, a partir de la matriz de vectores y valores característicos (Tabla VII) se observó que con los cuatro primeros valores característicos de los 12 involucrados, es posible explicar el 86.67 % de la variabilidad de los datos.

Dicho en otras palabras las 8 variables restantes en su conjunto sólo aportan el 13.33 % de la variabilidad de los datos, no aportan información significativa del sistema hidrotermal ó bien son redundantes.

### MATRIZ DE COMPONENTES PRINCIPALES.

Para conocer cuáles son las variables que caracterizan al sistema y cuáles son redundantes, se realizó un estudio de cada uno de los valores característicos mediante el análisis de la matriz de "ejes principales" (Tabla VIII). En dicha matriz las columnas representan los vectores característicos, mientras que los renglones, representan a cada una de las variables originales.

### COMPONENTE PRINCIPAL 1

Para entender mejor estas cuestiones, la componente principal C1 (Tabla VIII, columna 1) está compuesta por la siguiente combinación vectorial:

$$C1 = \frac{0.763433(Ba)}{0.065849(Nb)} + \frac{0.956352(Co)}{0.932952(Ni)} + \frac{0.890853(Cr)}{0.214214(Au)} + \frac{0.750626(Cu)}{0.485983(Pb)} - 0.071023(Ag) - 0.019356(Rb) + 0.438138(Zn) + 0.427344(Tl)$$

Esta componente puede interpretarse como una función del peso que aportan cada uno de sus elementos. Puede verse que los valores de los elementos Nb, Au, Pb, Ag, Rb, Zn y Tl (Tabla VII, columna 1), no aportan mucho a la magnitud total de la componente C1.

Los elementos que sí lo hacen son: Ba, Cu, Co, Cr y Ni, entonces, la componente C1 explica aquellas propiedades que estén relacionadas con el comportamiento, asociación y distribución espacial del Ba, Cu, Co, Cr y Ni dentro del sistema hidrotermal.

La componente C1, tiene un peso dentro de la matriz de valores característicos (Tabla VII) de 47.85 %. En consecuencia podemos afirmar que, con el estudio del comportamiento de los elementos Cu, Co, Cr y Ni en las rocas muestreadas, conoceremos cerca del 48% del patrón de distribución de los elementos traza analizados.

La figura 15a), representa gráficamente dicha distribución, preferencial en las andesitas que contienen al acuífero profundo a profundidades mayores a 1000 m.

Este patrón de distribución puede obedecer a que el Cu, Co, Cr y Ni son

metales pesados, elementos del grupo denominado de transición (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni y Cu). Estos elementos son compatibles con minerales ferromagnesianos debido a su similitud con el  $Mg^{+2}$  y el  $Fe^{+2}$  (radio iónico y carga).

El Níquel entra fácilmente en la estructura de los minerales ferromagnesianos como el olivino (presente en las unidades andesíticas de La Primavera (Hernández, 1996)) porque su radio iónico es muy similar al del magnesio y al del hierro (Ni 0.77Å; Mg 0.80Å;  $Fe^{+2}$  0.86Å).

El contenido y asociación de Cr y Co en las andesitas de La Primavera puede explicarse en términos de su ocurrencia en minerales como la hedenbergita, donde el Cr ó el Co pueden sustituir al Fe ó al Mg. Minerales de alteración como clorita, sericita y epidota, (detectados en las andesitas) pueden contener Cr en su estructura cristalina. Minerales arcillosos como la montmorillonita pueden atrapar en su estructura a estos metales.

La figura 15a, es la imagen correspondiente a la Componente Principal 1, en ella, las partes con coloraciones claras representan zonas con altos valores de correlación geoquímica de la asociación Ni, Co, Cr (cercaos a 1). Las zonas con coloraciones oscuras, por el contrario son aquellas con valores de correlaciones bajos (cercaos a -1).

En la figura 15b, se han superpuesto: una escala vertical, la traza de los pozos muestreados (líneas blancas verticales), fallas detectadas (líneas inclinadas continuas), fallas inferidas (líneas inclinadas discontinuas), así como la litología a profundidad.

## COMPONENTE PRINCIPAL 2

La componente C2 tiene, entre sus principales componentes al Zn y al Rb (Tabla VIII, columna 2, renglones 10 y 11). Las demás variables tienen valores poco representativos. El significado geológico de esta componente recae en la asociación y distribución de los elementos Zn y Rb, ya que éstos elementos favorecen dicha componente.

Por una parte, el Rb es un metal alcalino del grupo IA, el cual consiste de Li, Na, K, Rb, Cs y Fr, con valencia de  $1^+$  soluble en agua y fluidos acuosos. Es uno de los elementos traza más móviles. Su radio iónico (1.48Å), es similar al del potasio (1.33Å), debido a su gran radio iónico se encuentra entre los elementos incompatibles, por lo que no forma minerales, pero permite la sustitución de K por Rb en los minerales que contienen K, tales como micas (muscovita, biotita, flogopita y lepidolita) y feldespatos-K (ortoclasa, sanidino y microclina), en ciertos minerales arcillosos (montmorillonita) y evaporitas como silvita y carnalita (Faure, 1986).

Ya Mahood (1981b) había reportado un enriquecimiento de Rb, Zn y Na en las rocas de la porción que se produjo primero de la Toba Tala. Hernández (1966)

por su parte, y con base en resultados de Fluorescencia de rayos X, detectó enriquecimientos de Ba, Cu, Cr, Ni y Sr en muestras profundas (más de 1000 m) de la Primavera, siendo la excepción el Rb y el Zn, teniendo concentraciones anómalas de éstos elementos en muestras someras (menos de 1000 m).

El origen de elementos tales como el Rb, B, F, As, Li, K y Cs, encontrados en cantidades significativas en aguas termales, se supone a partir del líquido residual proveniente de la cristalización de un magma. Sin embargo evidencias experimentales sugieren que altas concentraciones de éstos elementos en una fase acuosa a altas temperaturas pueden ocurrir durante la alteración hidrotermal y recristalización de rocas a moderadas temperaturas (Ellis, 1987).

La figura 15d, correspondiente a la componente principal 2, presentó el patrón de distribución de la asociación Zn-Rb en las rocas someras del campo (menos de 1000 m de profundidad), concentrándose en las riolitas, tobas líticas y en las rocas que contienen al acuífero somero (Toba Tala). La componente C2, junto con la anterior (C1), suman un peso total de 69.99 % de la variación del patrón de depositación de los elementos traza.

Tanto las unidades riolíticas, tobas líticas, así como la Toba Tala, están constituidas por una gran cantidad de fenocristales de sanidino, dándose las condiciones para que exista sustitución de K por Rb en dichas unidades.

En el caso del Zn es un problema complejo por que este elemento se caracteriza por presentarse enriquecido en todas las rocas de la columna. Por una parte, se identificó (en superficie pulida), esfalerita en las andesitas del acuífero profundo.

Por otra, probablemente en su camino hacia la superficie el fluido hidrotermal disolvió precipitados de Fe ricos en Zn, los cuales en la superficie fueron absorbido en la estructura de las arcillas de la alteración somera y por algunos oxidos de fierro.

### **COMPONENTE PRINCIPAL 3.**

La componente C3 (Tabla VII, columna 3) aporta el 10.20 % del comportamiento del sistema, tiene tres constituyentes principales; Tl (0.865890), Ag (0.427262) y Au (0.208091). Por la naturaleza económica de éstos elementos, siempre es importante conocer su distribución espacial (Figura 16a).

La precipitación de éstos metales, a partir de soluciones hidrotermales, tiene lugar donde los iones complejos, que transportan a los metales, al desestabilizarse dan como resultado que la solubilidad de los metales en cuestión se reduzca drásticamente.

Los factores (como ya se ha mencionado en el capítulo IV), que propician esta desestabilización pueden ser: Decremento de la temperatura, pérdida de presión en el sistema y/o ebullición (siendo la ebullición una de las principales

causas del decremento en la temperatura) ó cambios en las condiciones redox de las soluciones (que pueden ser causados por dilución con aguas frías meteóricas infiltradas) (Pirajno, 1992).

El transporte de metales como Au, Ag y TI en soluciones hidrotermales ocurre predominantemente como complejos de Cl ó de S.

En muestras de núcleos de La Primavera, se detectó calcita hojosa relleno de cavidades en las andesitas del pozo geotérmico PR-11 a 1720 m de profundidad. La calcita hojosa evidencia fenómenos de ebullición como resultado de la repentina pérdida de presión de las soluciones hidrotermales ascendentes.

En esa zona del campo, existe una gran cantidad de fallas sub-verticales, intersectadas por los pozos PR-1, PR-8, PR-5 y PR-12, esta parte de la sección A-A' es coincidente con las zonas de valores más altos de correlación de la asociación Au - Ag - TI (figura 14a).

De lo anterior se puede suponer que éstos metales viajaron en complejos desde el acuífero profundo, ascendieron a través de las rocas y se depositaron debido, a una pérdida repentina de presión, evidenciada por la presencia de calcita hojosa.

#### **COMPONENTE PRINCIPAL 4.**

La componente C4 (Tabla VII, columna 4) tiene como componentes al Cr y al Ni cuyo conocimiento aporta el 6.48 % del sistema (Figura 16 b). La Figura 16b, presenta la distribución del Cr y Ni en los primeros 700m de profundidad y por debajo de los 2000m mostrando una zona de alta correlación asociada a las fallas en la vecindad del pozo PR-5.

#### **COMPONENTE PRINCIPAL 5.**

La componente C5 (Tabla VII, columna 5) tiene como elemento principal al Nb cuyo conocimiento aporta el 4.15 % de la información de la componente. La Figura 16 c, presenta el comportamiento espacial del Nb, donde los valores mas altos de correlación, mostraron una distribución preferencial en la vecindad de la traza del pozo PR-1.

La mayor correlación de estos elementos se encuentra en las zonas de intenso fracturamiento en la vecindad de los pozos PR-8 y PR-5, en un intervalo de profundidades desde los 2000m hasta la superficie.

#### **OTROS COMPONENTES.**

Las componentes restantes, del C6 al C12 (Figuras: 16d, 17a, 17b, 17c, 17d, 18a y 18b) aportan en conjunto el 7.83% del conocimiento del problema.

El significado geológico de éstas 7 componentes no es fácil de interpretar, ya que en la mayoría se involucran variables sin una relación geológica evidente. La componente C6 posiblemente tenga que ver con el comportamiento del Au ya que es la variable de mayor peso en esa componente (Figura 16 d).

Tabla V. Matriz de VARIANZA-COVARIANZA para los datos de las muestras de La Primavera

VAR/COVAR	Ba	Co	Cr	Cu	Nb	Ni	Au	Pb	Ag	Rb	Zn	Tl
Ba	1869.63											
Co	1794.45	3463.35										
Cr	1250.09	2600.04	3058.74									
Cu	780.15	1244.47	772.51	807.10								
Nb	-109.72	-16.72	-295.94	-20.45	740.18							
Ni	819.17	1858.32	1656.06	610.89	-64.30	1173.52						
Au	178.97	218.62	147.36	61.88	149.38	142.34	409.72					
Pb	302.55	493.81	263.40	416.35	-23.59	248.27	26.12	306.45				
Ag	135.93	172.99	-96.43	41.26	78.64	43.90	48.19	-18.68	420.36			
Rb	255.50	-218.67	-277.66	-16.34	707.23	-145.08	304.88	-48.11	4.72	2825.00		
Zn	681.21	814.95	653.59	330.27	397.32	438.75	257.50	81.12	24.72	1531.24	1396.21	
Tl	485.94	954.47	724.93	351.73	-203.63	554.46	155.19	211.44	317.36	-310.46	214.41	2179.89

Tabla VI. Matriz de CORRELACIÓN para los datos de las muestras de La Primavera.

MATRIZ COR	Ba	Co	Cr	Cu	Nb	Ni	Au	Pb	Ag	Rb	Zn	Tl
Ba	1.000000											
Co	0.705189	1.000000										
Cr	0.522750	0.798842	1.000000									
Cu	0.635096	0.744342	0.491664	1.000000								
Nb	-0.093265	-0.010441	-0.196684	-0.026457	1.000000							
Ni	0.553036	0.921782	0.874097	0.627700	-0.068991	1.000000						
Au	0.204487	0.183529	0.131633	0.107602	0.271263	0.205278	1.000000					
Pb	0.399698	0.479326	0.272060	0.837175	-0.049526	0.414004	0.073718	1.000000				
Ag	0.153325	0.143369	-0.085039	0.070838	0.140990	0.062500	0.116119	-0.052041	1.000000			
Rb	0.111174	-0.069909	-0.094457	-0.010819	0.489030	-0.079681	0.283386	-0.051704	0.004328	1.000000		
Zn	0.421625	0.370601	0.316269	0.311121	0.391333	0.342769	0.340458	0.124017	0.032271	0.771011	1.000000	
Tl	0.240705	0.347375	0.280742	0.265175	-0.160307	0.346663	0.164209	0.258692	0.331530	-0.125107	0.122900	1.000000



Tabla VII. Valores y vectores caracteristicos obtenidos a partir de la matriz de correlación

COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
% var.	47.85	22.04	10.20	6.48	4.15	2.18	2.16	1.63	1.46	1.17	0.42	0.27
eigenval.	8924.62	4109.92	1902.31	1207.94	774.68	406.38	402.25	303.42	272.09	217.80	78.18	50.56
eigvec.1	0.349425	0.124211	0.017383	-0.621057	-0.454518	0.255098	-0.064278	-0.327545	-0.234417	-0.068872	0.182765	0.016799
eigvec.2	0.595759	-0.043635	-0.110248	-0.165959	0.343827	-0.217027	0.334024	0.238752	-0.290611	-0.062476	-0.374394	0.202605
eigvec.3	0.521534	-0.077902	-0.241011	0.559318	-0.200663	0.195484	-0.146428	-0.357129	0.262643	-0.128424	-0.192769	-0.030247
eigvec.4	0.225731	0.001858	-0.004241	-0.338409	0.139273	-0.269147	-0.308381	0.136453	0.446939	-0.000966	-0.091740	-0.648671
eigvec.5	-0.018964	0.242754	-0.009173	-0.078754	0.757593	0.227240	-0.139879	-0.515483	-0.029318	-0.062855	0.135036	0.022465
eigvec.6	0.338305	-0.049879	-0.071545	0.193359	0.108577	-0.030049	0.080502	0.290413	-0.031820	-0.063915	0.852936	-0.066676
eigvec.7	0.045899	0.097976	0.096574	0.041810	0.083202	0.732620	-0.275456	0.531152	-0.149852	-0.072992	-0.175213	-0.126684
eigvec.8	0.090055	-0.013610	0.023075	-0.196949	0.037365	-0.054540	-0.418338	0.181946	0.470376	0.012097	0.055502	0.717929
eigvec.9	0.015414	-0.020716	0.200848	-0.142383	0.027690	0.363101	0.687409	-0.006887	0.577341	-0.010856	0.009398	0.001792
eigvec.10	-0.010890	0.808001	0.116582	0.130190	-0.131831	-0.202867	0.070284	0.104727	0.063632	-0.486145	-0.033034	0.023569
eigvec.11	0.173297	0.477695	0.035696	0.110512	-0.045241	-0.000118	0.022875	0.022780	0.018680	0.851378	-0.002524	0.000000
eigvec.12	0.211203	-0.154616	0.926915	0.160704	0.015858	-0.109201	-0.113278	-0.112806	-0.092500	-0.007077	-0.012240	0.000000

Tabla VIII. Matriz de COMPONENTES PRINCIPALES para los datos de las muestras de La Primavera.

LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
Ba	0.763433	0.184161	0.017534	-0.499203	-0.292574	0.118931	-0.029815	-0.131952	-0.089427	-0.023507	0.037374	0.002762
Co	0.956352	-0.047534	-0.081708	-0.098011	0.152612	-0.074342	0.113835	0.070568	-0.081455	-0.015667	-0.056251	0.024479
Cr	0.890853	-0.090301	-0.190067	0.351489	-0.100985	0.071254	-0.053101	-0.112480	0.078334	-0.034269	-0.030819	-0.003889
Cu	0.750626	0.004193	-0.006510	-0.414001	0.136447	-0.190981	-0.217706	0.083571	0.259501	-0.000502	-0.028553	-0.162348
Mb	-0.065849	0.572024	-0.014705	-0.100607	0.775048	0.168376	-0.103117	-0.330040	-0.017775	-0.034095	0.043887	0.005871
Mi	0.932952	-0.093345	-0.091091	0.196174	0.088218	-0.017683	0.047131	0.147570	-0.015322	-0.027535	0.220152	-0.013839
Au	0.214214	0.310307	0.208091	0.071789	0.122656	0.729624	-0.272932	0.457082	-0.122116	-0.053218	-0.076537	-0.044500
Pb	0.485983	-0.049843	0.057492	-0.391018	0.059408	-0.062806	-0.479284	0.181043	0.443219	0.010198	0.028033	0.291600
Mg	0.071023	-0.064774	0.427262	-0.241361	0.037590	0.357010	0.672434	-0.005851	0.464488	-0.007814	0.004053	0.000622
Rb	-0.019356	0.974585	0.095668	0.085132	-0.059035	-0.076943	0.026521	0.034322	0.019748	-0.134985	-0.005495	0.003153
Zn	0.438138	0.819581	0.041666	0.102791	-0.033699	-0.000064	0.012278	0.010519	0.008246	0.336259	-0.000597	0.000000
Zl	0.427344	-0.212302	0.865890	0.119628	0.009454	-0.047149	-0.048660	-0.042086	-0.032680	-0.002237	-0.002318	0.000000

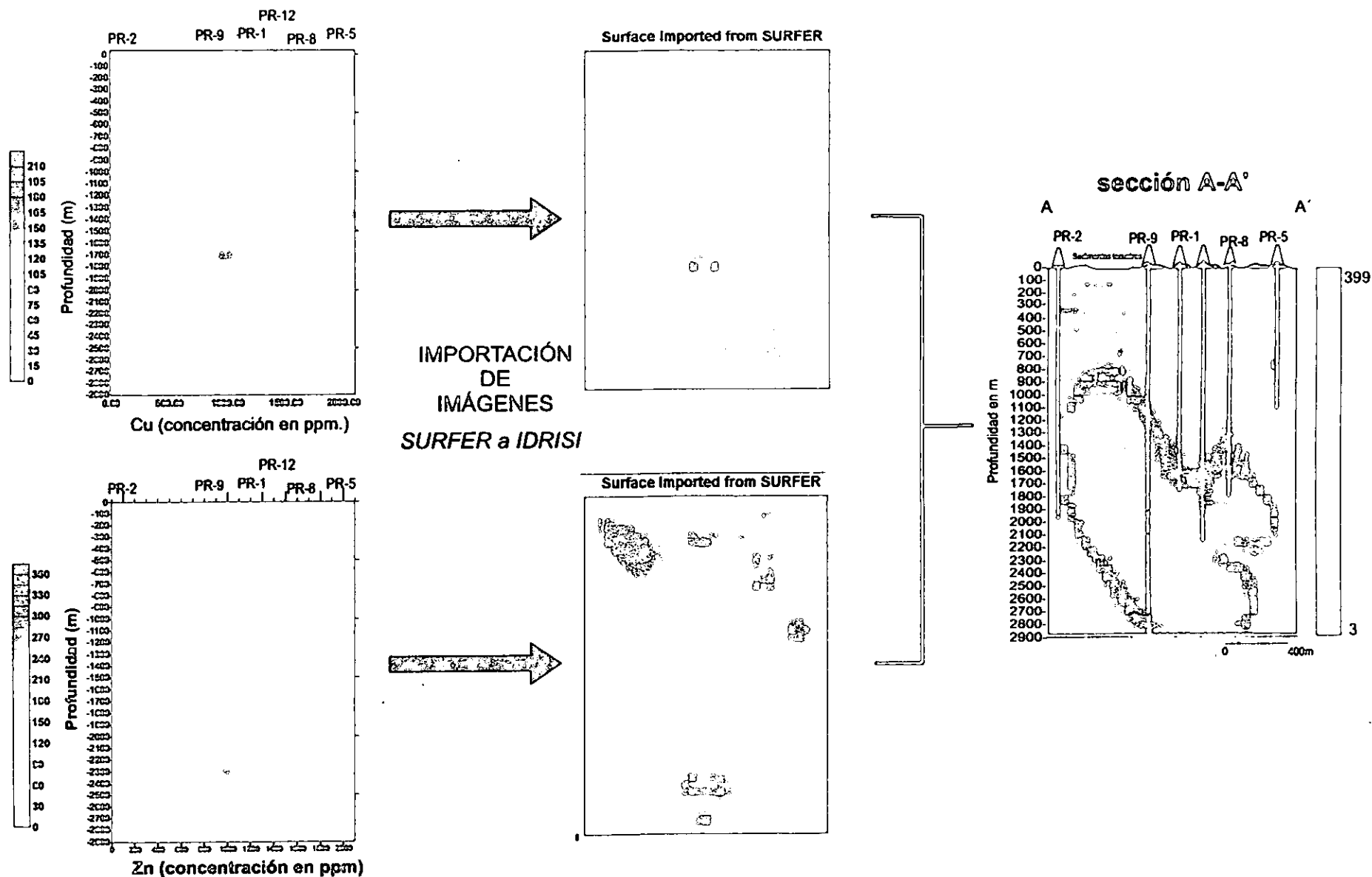
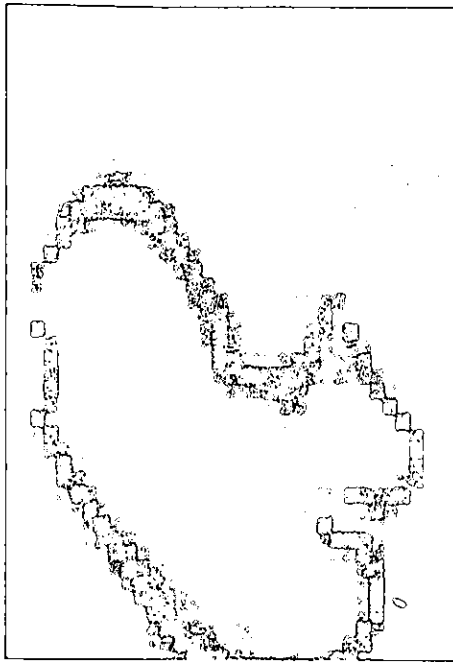
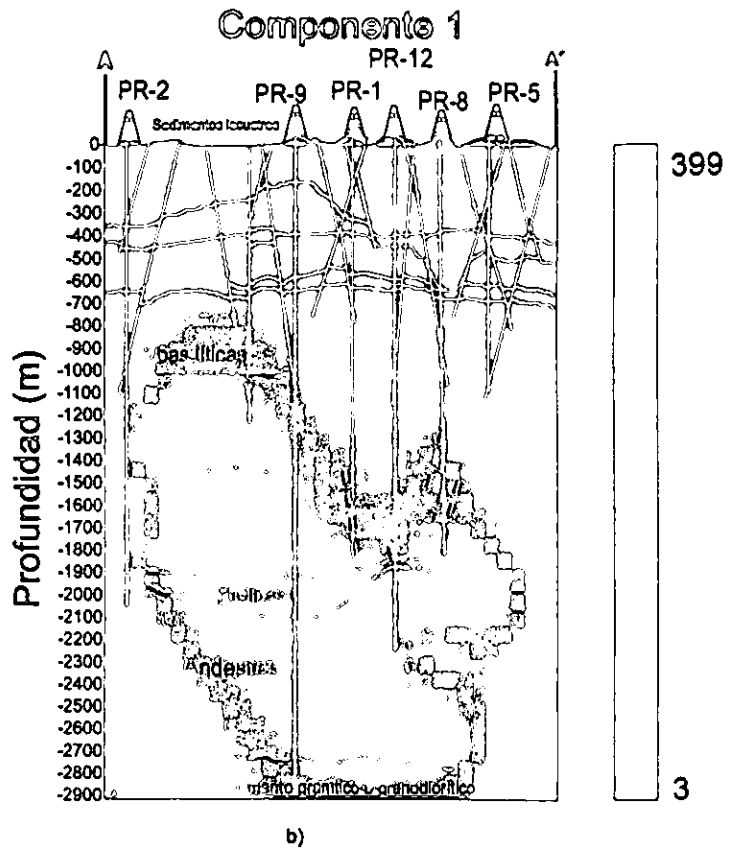


Figura 14 Diagrama que esquematiza la exportación de imágenes de SURFER 6 a IDRISI FOR WINDOWS y la generación de nuevas imágenes denominadas Componentes Principales, en la imagen final se ha sobrepuesto la traza de los pozos muestreados, profundidad en m fallas, litología de la sección y una escala de colores para referencia.

### Componente 1

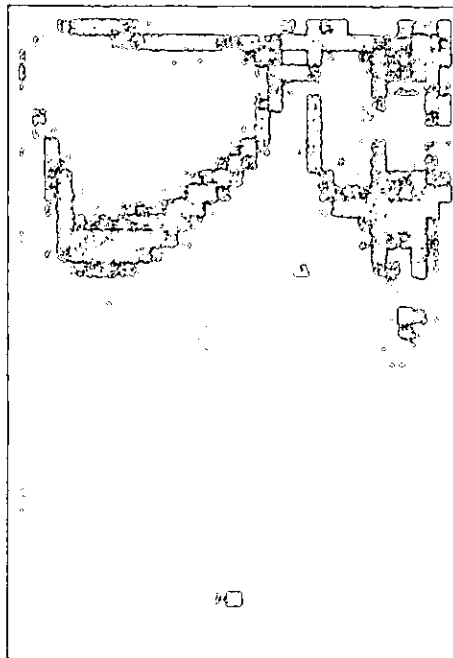


a)

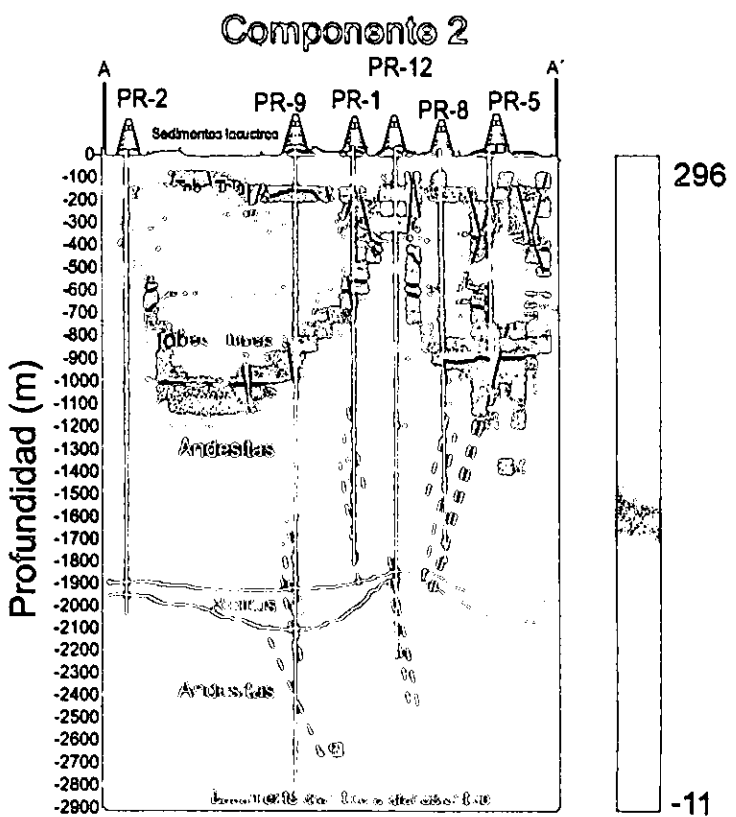
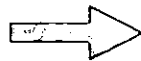


b)

### Componente 2



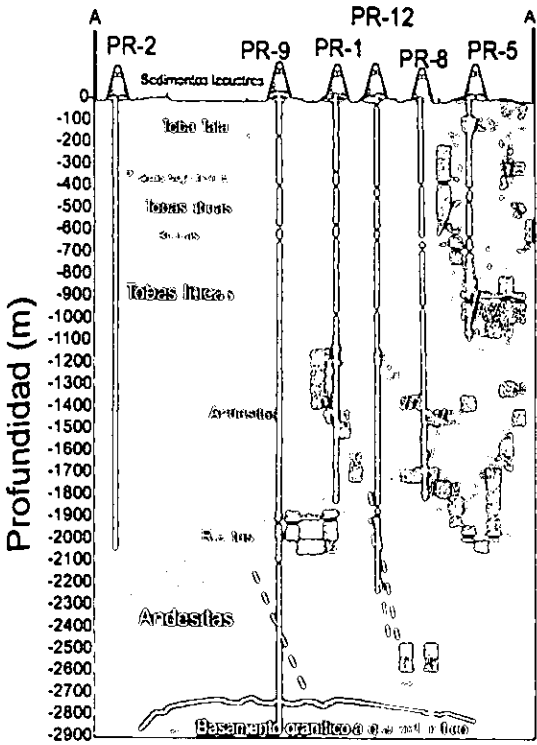
c)



d)

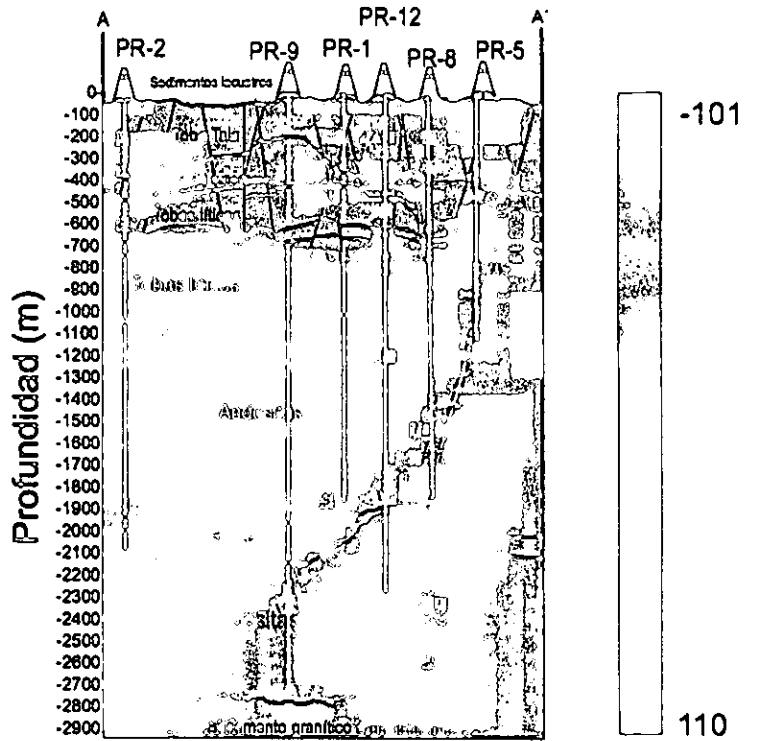
Figura 15 Imágenes correspondientes a los componentes principales a)1 y c)2, las figuras 13a) y 13b) representan a dichos componentes con la traza de los pozos y los contactos litológicos superpuestos para referencia.

### Componente 3



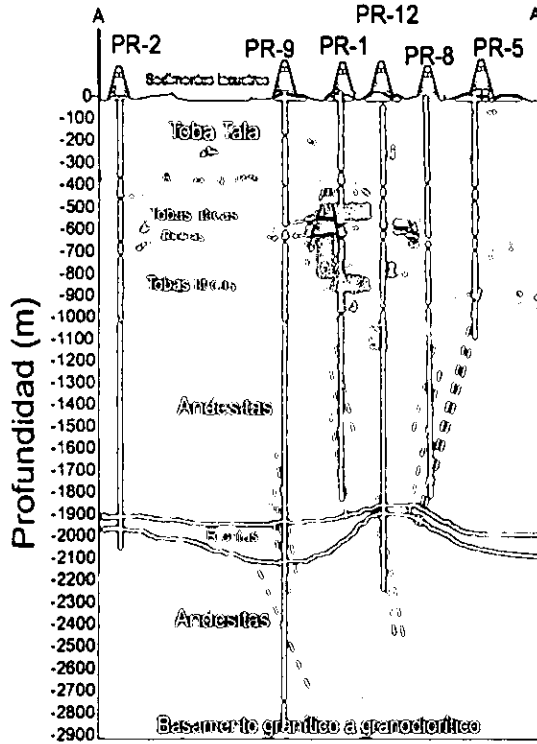
a)

### Componente 4



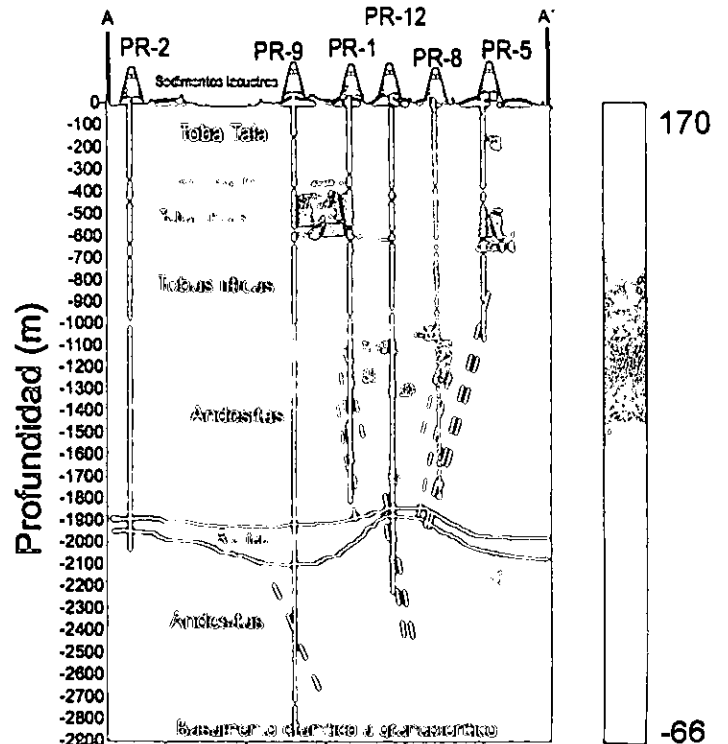
b)

### Componente 5



c)

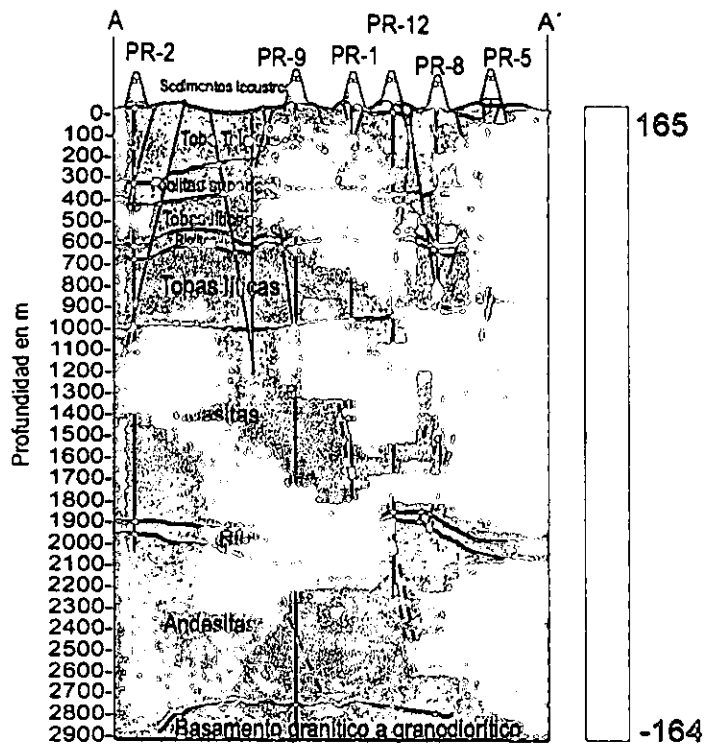
### Componente 6



d)

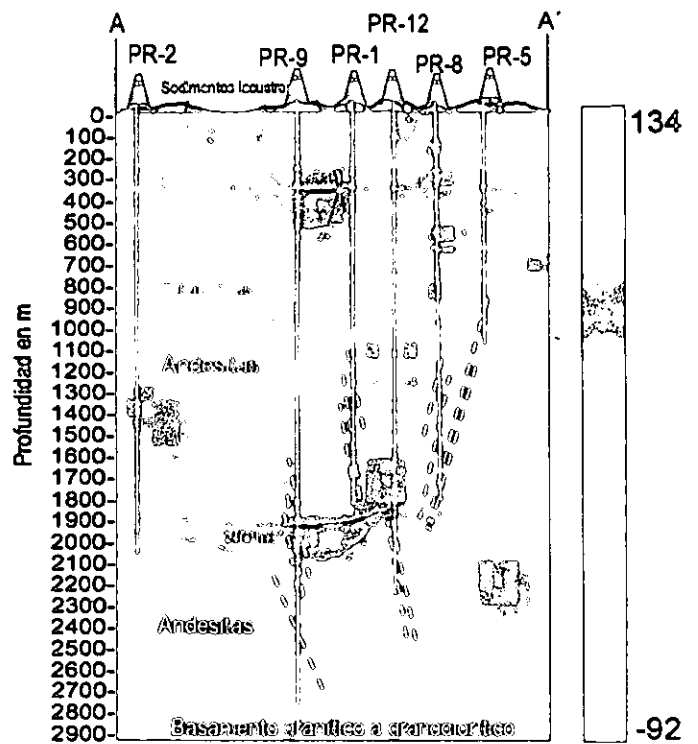
Figura 16. Imágenes correspondientes a los componentes principales a) 3, b) 4, c) 5 y d) 6

### Componente 7



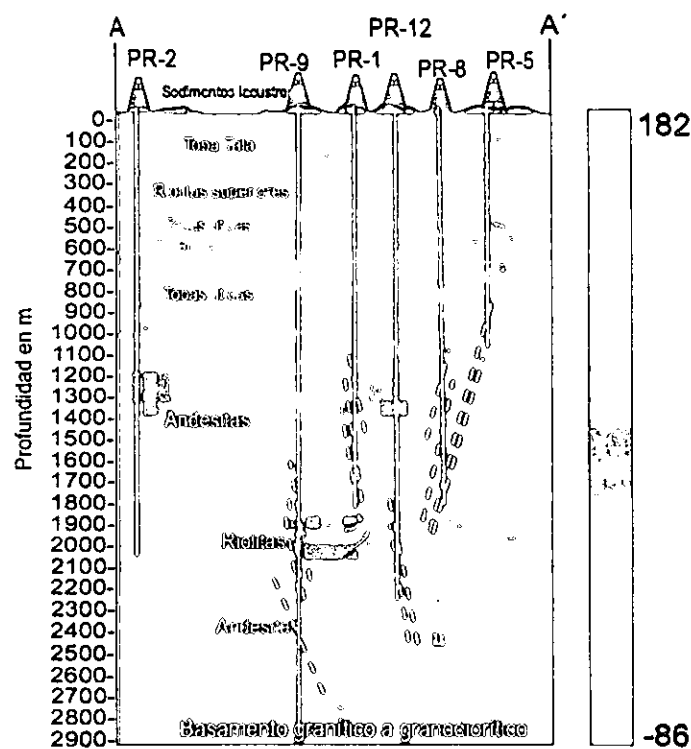
a)

### Componente 8



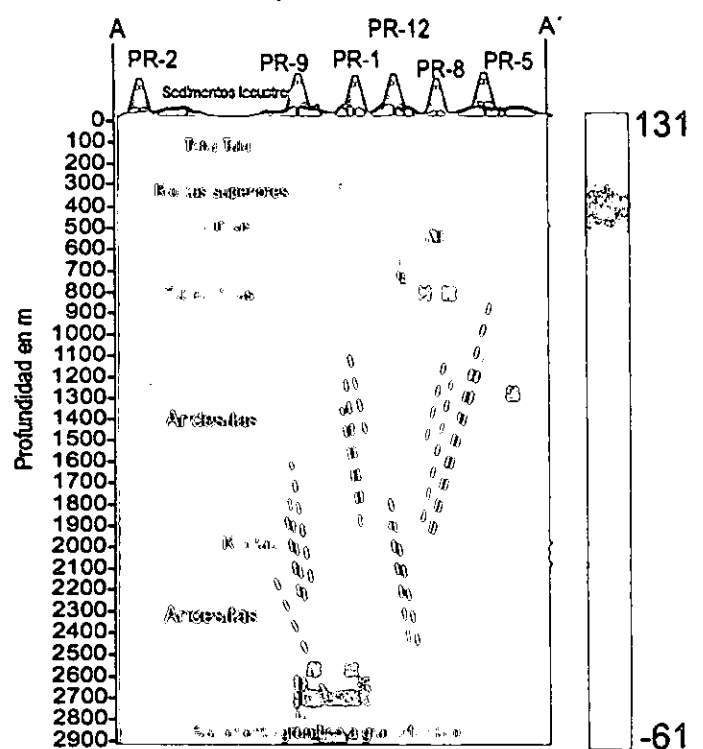
b)

### Componente 9



c)

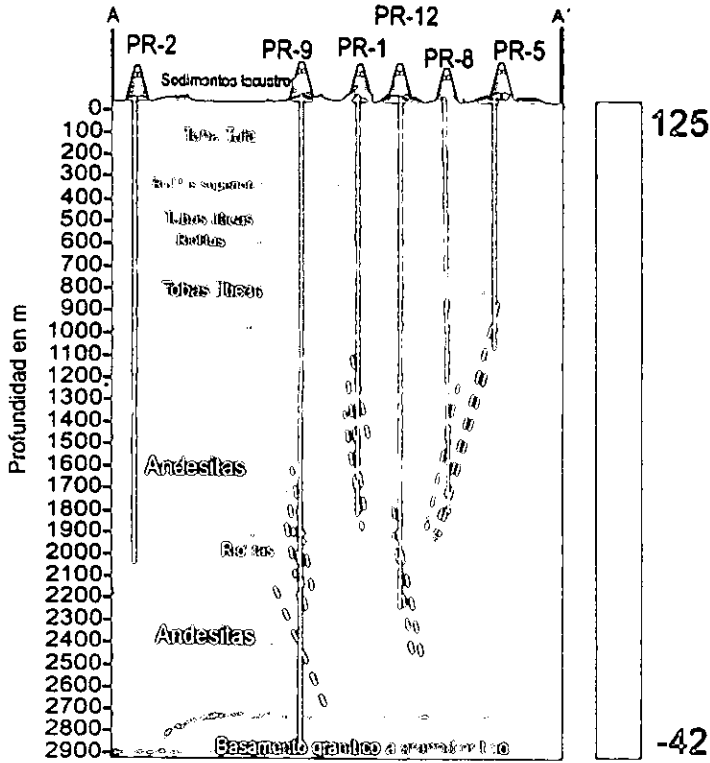
### Componente 10



d)

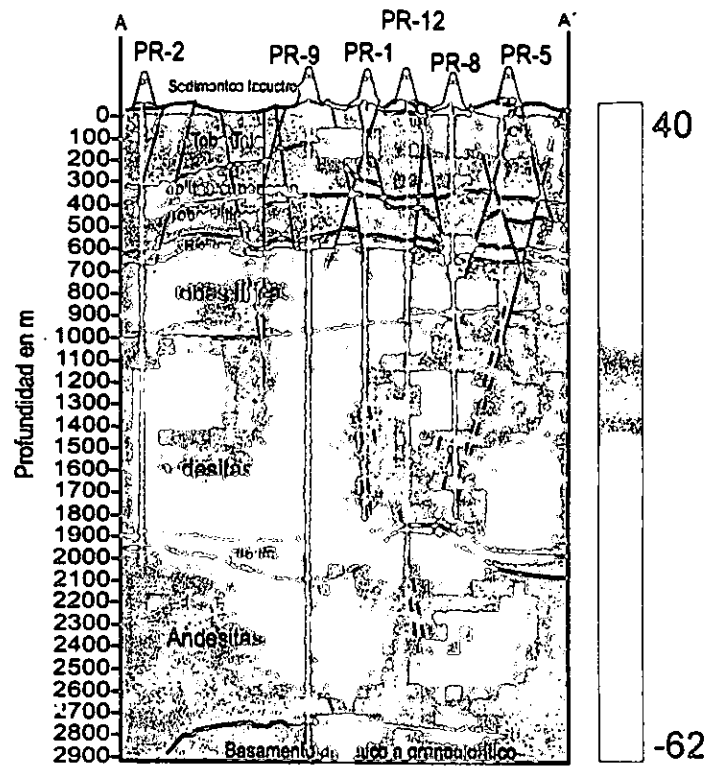
Figura 17. Imágenes correspondientes a los componentes principales: a)7, b)8, c)9 y d)10

### Componente 11



a)

### Componente 12



b)

Figura 18. Imágenes correspondientes a los componentes principales a)11, b)12

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.

⇨ El campo geotérmico de La Primavera, Jalisco, México, localizado a 5 km al NW de la ciudad de Guadalajara, está asociado a una caldera riolítica, pleistocénica, está constituido por: flujos de lavas, flujos de cenizas, pómez de caída, domos y sedimentos lacustres.

⇨ Las asociaciones mineralógicas de alteración, identificadas en los pozos de La Primavera, son características de regímenes geotérmicos activos como los de Cerro Prieto, B.C., Los Azufres, Mich., Los Humeros, Pue., y otras partes del mundo.

⇨ El papel de la estadística, en este trabajo, se restringió a detectar relaciones entre poblaciones de datos, así como la magnitud y naturaleza de esas relaciones.

⇨ El análisis por Componentes Principales, aplicado en este trabajo es, esencialmente descriptivo y tiene una interpretación geométrica en planos de mejor ajuste y vectores de máxima concentración, en función de distancias euclidianas.

⇨ Al tratarse éste trabajo, de un análisis de naturaleza estadística, la capacidad para explicar el comportamiento del sistema hidrotermal de La Primavera y la precisión de los resultados obtenidos son función del número de datos que pudieron aportarse. Es entonces preferible una cantidad considerable de información, para reducir los márgenes de errores analíticos y obtener parámetros de la información (medias, varianzas etc.,) más cercanos a los reales.

⇨ Al aplicar este tipo de procesamientos a los datos analíticos de las rocas del campo geotérmico de La Primavera, fue posible conocer la distribución regionalizada de cada componente, es decir, se definieron de forma gráfica, grupos con información homogénea.

⇨ Los patrones más representativos obtenidos por este método fueron los correspondientes a los siguientes grupos de elementos; Ni-Cr-Co-Cu, Zn-Rb y Au-Ag-Tl. Algunos de los patrones identificados, obedecen sobre todo, al tránsito ascendente de los fluidos hidrotermales a través de los planos de falla.

⇨ Las figuras generadas en *IDRISI FOR WINDOWS*, a partir de los datos accesados, son *modelos artificiales* del comportamiento de algunos elementos químicos bajo condiciones hidrotermales activas

⇨ La componente principal C1, Describió la distribución a profundidad de la asociación de elementos (Cu, Co, Cr y Ni).

⇨ La componente principal C1, se interpretó como función del peso aportado por cada uno de sus elementos. La distribución de la asociación (Cu, Co, Cr y Ni) se mostro preferencialmente, en las andesitas que contienen al acuífero profundo a profundidades mayores a 1000 m.

⇨ Esta distribución puede obedecer a que el Cu, Co, Cr y Ni son metales pesados, compatibles con minerales ferromagnesianos debido a su similitud con el  $Mg^{+2}$  y el  $Fe^{+2}$  en radio iónico y carga.

⇨ La presencia del Níquel se debe a que éste, penetra en la estructura de minerales como el olivino debido a que su radio iónico es muy similar al del  $Mg^{+2}$  y al del  $Fe^{+2}$ .

⇨ Por otra parte, la presencia de Cr y Co en las andesitas de La Primavera puede explicarse, debido a la minerales como la hedenbergita, donde el Cr ó el Co pueden sustituir al Fe ó al Mg. Minerales de alteración presentes como clorita, sericita y epidota, pueden contener Cr en su estructura cristalina. Algunos minerales arcillosos como la montmorillonita pueden atrapar en su estructura a estos metales.

⇨ La componente principal C2, con un peso de 22.04%, presentó el patrón de distribución de la asociación Zn-Rb en las rocas someras del campo (menos de 1000 m de profundidad), concentrándose en las riolitas, tobas líticas y en las rocas que contienen al acuífero somero (Toba Tala).

⇨ Las unidades riolíticas, tobas líticas y la Toba Tala, presentan una gran cantidad de fenocristales de sanidino, dándose las condiciones para que exista sustitución de K por Rb en dichas unidades.

⇨ La componente C3, está constituida por tres elementos; Tl, Ag y Au. La presencia de éstos metales en las rocas, a partir de las soluciones hidrotermales, tuvo lugar donde iones complejos, que transportan a los metales, al desestabilizarse dan como resultado que la solubilidad de los metales en cuestión se reduzca drásticamente.

⇨ En la vecindad de los pozos PR-1, PR-8, PR-5 y PR-12, existe una gran cantidad de fallas sub-verticales, intersectadas por los mismos, esta parte de la sección A-A' es coincidente con las zonas de valores más altos de correlación de la asociación (Au-Ag-Tl) (Figura 16). Estos metales viajaron en complejos desde el acuífero profundo, ascendieron a través de las rocas y se depositaron en zonas de mayor interacción agua-roca, donde, debido a una pérdida repentina de presión, evidenciada por la presencia de calcita hojosa.



⇨ Las componentes restantes, del C4 al C12 aportan en conjunto el 19.92% del conocimiento del problema.

⇨ El significado geológico de éstas 9 componentes no es fácil de interpretar, ya que en la mayoría se involucran variables sin una relación geológica evidente. Desde el punto de vista práctico, las consideraciones anteriores podrían tener uso dentro de los métodos de explotación y planificación de nuevas perforaciones

## GLOSARIO

**COVARIANZA.**- Promedio de los productos entre las desviaciones de los valores por pares, la covarianza se usa para determinar la relación entre 2 conjuntos de datos, por ejemplo, para examinar si un nivel elevado de ingresos corresponde a un mayor nivel educativo

$$\text{COV}(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)$$

**COEFICIENTE DE CORRELACIÓN.**-Determina la relación entre dos propiedades, por ejemplo para examinar la relación entre la temperatura promedio de una localidad y el uso de aire acondicionado.

Donde

Y

$$\text{COV}(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)$$

**DESVIACION ESTANDAR.**-La desviacion estandar, que es la raíz cuadrada de la Varianza, mide la dispersión de los datos respecto al promedio (media). Usando la formula siguiente:

**PARAMETRO.**- Es una caracterización de la poblacion numerica (valores fijos).

**POBLACION.**- Es una colección de toda la posible información que caracteriza a un fenómeno.

**MEDIA.**- Es uno de los parametros mas representativos de la distribución, conociendo la media se tiene una idea del valor central de la distribución.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

**MUESTRA.**- es un subconjunto representativo de esa poblacion.

**VARIANZA.**- La varianza, junto con la media, es uno de los mas importantes parametros descriptivos, ya que es un indicador de la dispersion de los posibles valores de la variable aleatoria con respecto a su media  $\bar{x}$

## BIBLIOGRAFÍA.

TESIS DE MAESTRÍA  
DE LA UNIVERSIDAD

Alatorre-Zamora, M.A. y Campos-Enríquez, J.O. (1992) La Primavera caldera (México): Structure inferred from gravity and hydrological considerations. *Geofísica Internacional*. Vol 31., No. 4. pp 371-382.

Armstead, H. Christopher H. 1989. *Energía Geotérmica*. Limusa, México. 504 pp.

Cerriteño R., Octaviano. 1991. Características hidrodinámicas del acuífero somero de La Primavera. C.F.E. Informe interno 12/91, Marzo, 1991. 12 pp. Mapas, gráficas e ilustraciones.

Christidis E. George (1998). Comparative Study of the mobility of major and trace elements during alteration of an andesite and rhyolite to Bentonite, in the Island of Milos and Kimolos, Aegean, Greece. *Clays and Clays minerals*. Vol 46. No. 4 pp 379-399.

Cruz-Casas V.A. (1998) *Química de las aguas del campo geotérmico Primavera, Jalisco*, Tesis. F.I.-UNAM., México. 74 pp.

Demant, Alain 1978. Características del Eje Neovolcánico y sus problemas de interpretación. *Rev. Ins. Geol. UNAM*. Vol.2. No. 2. pp.172-187.

Eastman, J.R. (1997) *IDRISI for Windows. User's Guide*. Clark University Graduate School of Geography, Worcester, 393 pp.

Ferriz, H. y Mahood, G. A. 1986. Volcanismo riolítico en el Eje Neovolcánico Mexicano. *Geofísica Internacional*. Vol. 25-1. pp. 117-156.

Gutiérrez Negrín, Luis C. A. 1988. The La Primavera, Jalisco, México, Geothermal Field. *Geothermal Resources Council, TRANSACTIONS*, Vol. 12, Oct. 1988.

Gutiérrez Negrín, L. C. A. 1991. Recursos geotérmicos en La Primavera, Jalisco. Ciencia y Desarrollo. Vol. XVI, Núm. 96, 1991. p. 57-69.

Henley, R.W. (1985) The Geothermal framework for Epithermal deposits; Geology and geochemistry of epithermal systems: Society of Economic Geology. Reviews in Economic Geology. Berger and Bethke, Editors. pp 1-24.

Hernández Lombardini, S. I. (1986) Variaciones en la composición geoquímica de las rocas de La Primavera, Jalisco, como resultado de la alteración hidrotermal. 1996. Tesis. F.I.-UNAM., México. 62 pp.

Japanese International Cooperation Agency (JICA), 1989. Evaluación del yacimiento geotérmico en La Primavera. 122pp.

Kendall, M.G. (1980) A course in multivariate analysis, Griffin, Londres, 2da. ed., 210 págs.

Koch, George S. y Link, Richard F. (1980). Statistical Analysis of Geological Data. Dover Publications, New York, Vol 1. 438 pp.

López Hernández, Aída. (1991). Análisis estructural y aportes al conocimiento volcánico en La Sierra de La Primavera, Jal. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. F.C. UNAM. 80 pp.

Lozano Sta.-Cruz R. (1996). Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas

Mahood, Gail A. (1980). Geological Evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center: Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. J. Volcanol. Geotherm. Res., 8, pp. 199-230.

Mahood, G. A. (1981a). A summary of the Geology and Petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. Journal of Geophysical Research. Vol. 86, No. B11, pp. 10137-10152.

Mahood, G. A. (1981b). Chemical Evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center: Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. Contributions to Mineralogy and Petrology. Vol. 77. pp. 129-149.

Mahood, G. A., Truesdell, A. H. Y Templos, L. A. (1983). A reconnaissance geochemical study of La Primavera Geothermal Area, Jalisco, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 16. pp 247-261

Pirajno, Franco (1992). *Hydrothermal Mineral Deposits: principles and fundamentals concepts for the exploration geologist*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Printed in Germany.

Pla, Laura E. (1986). *Análisis multivariado: Método de componentes principales*. Departamento de Asuntos Científicos y Tecnológicos de la Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Washington, D.C. (EUA), 94 pp.

Ramírez Silva, Germán, Casco del Razo, Javier y Mata V., V. M. 1982a. *Hidrología regional de la zona geotérmica La Primavera-San Marcos-Hervores de La Vega, Jalisco*. C.F.E. Informe 14-82. Marzo, 1982. 57 pp. Mapas.

Ramírez Silva, Germán R. 1982b. *Hidrología superficial y subterránea en las zonas geotérmicas de la Primavera- San Marcos - Hervores de la Vega, Jal.* C.F.E. Informe AVR10-19-82. Abril, 1982. 34 pp.

Silberman, M. L. Y Berger B. R. (1985) Relationship of trace-element patterns to alteration and morphology in epithermal precious metals deposits; *Geology and Geochemistry of Epithermal systems: Ddociety of Economic Geology. Review in Economic Geology*. Berger and Bethke, Editors: pp 203.232.

Tatsch, J. 1981. *Geothermal Deposits*. Tatsch Associates. USA. 292 pp.

Torres Rodríguez, V. (Coord.) , Arellano Gómez, V., Barragán Reyes, R. M., González Partida, E., Herrera Franco, J. J., Santoyo Gutiérrez, E. y Venegas Salgado, S. 1993. *Geotermia en México* Programa Universitario de Energía - UNAM, México. 161 pp.

Venegas Salgado, S., Herrera , F., J.J. y Maciel, F.R. (1985). Algunas características de la Faja Volcánica y sus recursos geotérmicos. *Geofísica Internacional*. Vol. 24. No. 1. Pp. 47-81.

Venegas Salgado, S., Ramírez Silva., G., Romero González., C., Reyes Vermot., P., Razo Montiel., A., Gutiérrez Negrín, L. C. A., Arellano Guadarrama, F. y Perezyera y Zapata, J. (1988). Campo geotérmico de La Primavera, Jal. Geología económica de México. FCE., México. p. 128-141.

Villa Merlo S. J., Chacón Franco, M. y Orozco Medina, G. (1987) Utilización de la relación atómica  $Na^+/K^+$  para identificar zonas de mayor actividad hidrotermal en el campo geotérmico de La Primavera, Jalisco. Geotermia. Revista Mexicana de Geoenergía. Vol 3. No. 3. pp 241-244.

White D. (1955), Thermal Springs and Epithermal ore deposits: Economic Geology. Volumen del 50 Aniversario. Pp 99-154.