



11  
24

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

FACULTAD DE INGENIERIA

VARIACIONES EN LA COMPOSICION GEOQUIMICA  
DE LAS ROCAS DE LA PRIMAVERA, JALISCO,  
COMO RESULTADO DE LA ALTERACION  
HIDROTHERMAL

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A

**SERGIO IGNACIO HERNANDEZ LOMBARDINI**



MEXICO, D.F.

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-033

**SR. SERGIO IGNACIO HERNANDEZ LOMBARDINI**  
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:

**VARIACIONES EN LA COMPOSICION GEOQUIMICA DE LAS ROCAS DE LA PRIMAVERA,  
JALISCO, COMO RESULTADO DE LA ALTERACION HIDROTHERMAL**

- I INTRODUCCION**
- II ALTERACION HIDROTHERMAL COMO RESULTADO DE LA INTERACCION AGUA-ROCA**
- III GEOLOGIA DE LA ZONA DE ESTUDIO**
- IV CARACTERISTICAS GEOQUIMICAS DE ROCAS FRESCAS Y ROCAS ALTERADAS EN LA PRIMAVERA, JAL.**
- V MODELOS DE LA INTERACCION AGUA-ROCA**
- VI CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFIA  
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"**  
Ciudad Universitaria, a 30 de marzo de 1995  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS'EGLM'tjh.

8.

## Dedicatoria.

Dedico esta Tesis a mi madre Virginia Cecilia Lombardini Galicia, por su apoyo, su trabajo y esmero en mi formación como Ingeniero y principalmente por su amistad y cariño en tantos momentos que compartí con ella; le dedico esta Tesis por lo que representa, el eslabón final de una serie de etapas que comenzaron en mi educación preescolar y terminan con mis estudios profesionales;

gracias por todo mamá.

Tu hijo Sergio Ignacio Hernández Lombardini.

## **Agradecimientos:**

**A mi familia por su apoyo y comprensión.**

**A mis amigos sinceros en el atletismo, escuela y hogar por su amistad.**

**A mis profesores por sus enseñanzas y consejos.**

**A las personas encargadas de revisar este trabajo de investigación, por sus consejos y apoyo en la realización del mismo, así como sus correcciones y paciencia; en especial a:**

Dra. Rosa María Prol Ledesma.  
Ing. Alfredo Victoria Morales.  
Quim. Rufino Lozano Santa Cruz.  
Ing. Jorge Nieto Obregón.  
Ing. José Luis Jimenez.  
Ing. Carlos Garza Gonzalez.  
Ing. Lourdes García Cotero.  
Dra. Angels Canals.  
Dr. Esteban Cardellach.  
Guillermo Almaguer García.

**Por el apoyo económico recibido para la realización del mismo a:**

A la Comunidad Europea Contrato C11\*-CT94-0075.

DGAPA, Proy. IN101594.

Fundación UNAM.

VARIACIONES EN LA COMPOSICIÓN GEOQUÍMICA DE LAS  
ROCAS DE LA PRIMAVERA, JALISCO, COMO RESULTADO DE LA  
INTERACCIÓN HIDROTHERMAL.



*Universidad de Guadalajara*

## **Índice.**

### **Resumen.**

<b>I. Introducción.</b>	1
<b>II. Alteración hidrotermal como resultado de la interacción agua-roca.</b>	3
<b>II.1. Sistemas geotérmicos y alteración de la roca huésped.</b>	3
<b>II.2. Características de los fluidos y minerales de alteración asociados a los sistemas hidrotermales.</b>	6
<b>II.2.1. Fluidos de baja sulfidación.</b>	6
<b>III. Geología de la zona de estudio.</b>	8
<b>III.1. Localización y tipo geológico.</b>	8
<b>III.2. Geología.</b>	10
<b>III.3. Manifestaciones termales.</b>	16
<b>IV. Características geoquímicas de rocas frescas y rocas alteradas en La Primavera, Jal.</b>	18
<b>IV.1. Mineralogía primaria.</b>	18
<b>IV.2. Composición química de rocas frescas en La Primavera, Jal.</b>	19
<b>IV.2.1. Cámara magmática que formó la Toba Tala.</b>	21
<b>IV.3. Datos analíticos para las rocas que afloran en el Campo Geotérmico de La Primavera, Jal.</b>	22
<b>IV.4. Composición química de las rocas en el subsuelo en La Primavera, Jal.</b>	24

<b>V. Modelos de la interacción agua-roca.</b>	27
<b>V.1. Generalidades.</b>	27
<b>V.2. Geoquímica de manantiales.</b>	27
<b>V.2.1. Análisis químicos del agua de las manifestaciones superficiales de La Primavera y de los pozos de explotación.</b>	27
<b>V.3. Comparación de las características químicas de las rocas frescas y rocas alteradas.</b>	33
<b>VI. Conclusiones.</b>	37
<b>Bibliografía.</b>	39
<b>Apéndice petrográfico.</b>	42



## Resumen.

El área de estudio para este trabajo, el campo Geotérmico de La Primavera, se encuentra a 5 kilómetros al NW de Guadalajara, en la intersección del sector occidental de la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre Occidental, además de estar asociado a otras estructuras regionales de importancia. Su historia geológica reciente comienza con la aparición de las lavas de precaldera hace 145,000 años; terminando con la formación de las lavas de arco sur, siendo el domo El Colli el último en formarse hace aproximadamente 30,000 años. Todas 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 un constituyente importante como el vidrio volcánico que se encuentra en las tobas, también de composición riolítica.

Se hizo una comparación en cuanto a elementos mayores de las rocas frescas (análisis químicos realizados por Mahood) con muestras de rocas alteradas recolectadas y analizadas para este trabajo; estas rocas alteradas estaban asociadas a fumarolas o en contacto directo con manantiales calientes; esta comparación pudo hacerse ya que todas las rocas en superficie presentan una composición similar desde el punto de vista químico y ésta sólo varía por las interacciones fluido-roca presentes en el campo. Los análisis muestran un aumento en las concentraciones de hierro, magnesio y titanio; y una disminución en sílice, calcio, sodio, potasio y manganeso; lo que nos da indicio de que éstos últimos elementos tienen fuerte afinidad a viajar en el fluido hidrotermal.

Además, se hizo una comparación entre las variaciones de los elementos traza con respecto a la profundidad; con ayuda de muestras de recortes y núcleos de explotación; observamos como en general las muestras más profundas se encuentran enriquecidas en la mayoría de los elementos traza (con la excepción de dos muestras alteradas superficiales que presentan una concentración anómala de zinc) y las muestras superficiales solo presentan el enriquecimiento en rubidio.

Este estudio es básico para conocer las relaciones de éstos elementos y sus interrelaciones con el arsénico; un elemento de gran toxicidad para el ser humano al ingerirse en grandes cantidades (concentraciones mayores a 0.05 mg/l) y por un tiempo prolongado; el cual será analizado en un trabajo posterior; lo que nos dará idea de su comportamiento y sus relaciones con los elementos antes mencionados.

## I. Introducción.

El término hidrotermal abarca todos los tipos de fenómenos que involucran agua-caliente en la corteza de la tierra aunque la mayoría de las veces el término es usado en alusión a la impresionante actividad de los geysers, a las atractivas pozas calientes, etc.

En su sentido más amplio, el término describe un sistema de transporte de calor desde una fuente a profundidad hasta una zona de descarga que generalmente es la superficie de la tierra. Este transporte de calor usualmente se efectúa a través de un fluido geotérmico que puede ser magma, en el caso de sistemas volcánicos, o bien agua caliente o salmuera, vapor y gases en un sistema geotérmico en el sentido estricto del término (Prof, 1988).

Las expresiones superficiales de sistemas geotérmicos son los manantiales, fumarolas y otras indicaciones de actividad hidrotermal como las rocas alteradas por la acción de estos fluidos. Los fenómenos superficiales son generalmente una fracción muy pequeña de todo el tamaño del sistema geotérmico, aproximadamente el 5% del total del sistema (Henley, 1985).

Para generar un sistema geotérmico, es necesario tener una fuente de calor, una fuente de agua y un ambiente geológico provisto de zonas de permeabilidad original o secundaria que permitan el flujo del agua y su recarga (White, 1955). Generalmente, la fuente de calor es un magma en proceso de enfriamiento y atrapado a profundidad, el cual emite calor y gases a través de las rocas que lo rodean; cuando esos gases alcanzan las capas de rocas permeables en las que hay agua fría almacenada, es decir, un manto acuífero profundo, se mezclan con ella y la calientan originando un yacimiento geotérmico. La mezcla de fluidos magmáticos y agua meteórica queda atrapada a elevadas temperaturas y presiones, en virtud de que una capa sello impide su escape hacia la superficie, salvo a través de fracturas o fallas en las rocas (Gutiérrez Negrín, 1991).

Los sistemas de aguas calientes que tienen descargas de bajas a moderadas son químicamente similares a las aguas subterráneas, pero las aguas calientes cercanas a la ebullición, con descargas altas a moderadas están casi siempre caracterizadas por contenidos altos de cloruros alcalinos, SiO<sub>2</sub>, B y As (White, 1955). Sus diferencias químicas surgen de las fuentes de recarga de agua y la contribución de gases de fuentes magmáticas o metamórficas. Los manantiales además ocurren en la corteza tectónicamente estable en donde la penetración profunda del agua subterránea tiene lugar en formaciones sedimentarias favorables (por ejemplo calizas o areniscas) y el calor suministrado es el flujo de calor promedio en la corteza continental (Henley, 1985).

Los sistemas geotérmicos son abundantes en las zonas de actividad tectónica de la corteza terrestre y pueden ser clasificados acorde a su tipo de ambiente tectónico y fuente principal de calor.

Un aspecto muy importante en el estudio de los sistemas geotérmicos es su clasificación. Las características que se toman en cuenta para este fin son:

- La naturaleza del fluido dominante en la parte principal del yacimiento (agua caliente, vapor, salmuera, etc).
- La concentración de componentes químicos en el fluido dominante.
- La descarga superficial de calor.

-La entalpía o contenido energético.

Este trabajo servirá de base para el estudio posterior de un elemento traza importante debido a su peligrosidad en el caso de su ingestión abundante y prolongada por el ser humano, el arsénico. Ya que la interacción del agua hidrotermal con los acuíferos someros tiene gran influencia en las concentraciones de arsénico observadas en aguas de uso doméstico o agrícola y se presenta en muchos lugares que presentan intensa actividad tectónica, en especial en México por sus abundantes sistemas hidrotermales activos y fósiles. La mezcla del agua hidrotermal con las aguas subterráneas favorece la difusión de algunos elementos peligrosos para el medio ambiente, como el arsénico, en el agua subterránea de uso doméstico común, por lo cual es muy importante conocer el comportamiento del arsénico y sus relaciones con otros elementos. En el campo geotérmico de La Primavera, la concentración observada de arsénico en las aguas descargadas de los manantiales calientes y los estudios hidrológicos, han mostrado que los procesos de mezcla afectan la composición química del acuífero somero, el cual actualmente tiene algunos usos domésticos y agrícolas (Cerriteño Rodríguez, 1991). Por lo que este trabajo pretende ser un valioso aporte para conocer el comportamiento de un gran número de elementos, así como las posibles relaciones en las reacciones provocadas por las interacciones agua-roca. Esto nos servirá para el posterior estudio enfocado al arsénico, tratando de conocer los procesos que originan la contaminación, así como su distribución en la región y los posibles efectos en caso de una explotación intensiva del acuífero somero de La Primavera.

## **II. Alteración hidrotermal como resultado de la interacción agua-roca.**

En los sistemas hidrotermales, el agua meteórica en la parte superior de la corteza terrestre es el agente de transferencia del calor de una fuente ígnea profunda a una zona menos profunda. La energía se encuentra almacenada en la roca sólida así como en los fluidos (vapor y agua) que llenan los poros y fracturas. Las anomalías termales asociadas con los sistemas hidrotermales se encuentran en zonas de volcanismo joven, edificación de montañas, y otras manifestaciones termomagnéticas del comportamiento interno de la Tierra. Por lo que resulta de gran importancia conocer las alteraciones producidas por las reacciones de la interacción agua-roca

### **II.1 Sistemas geotérmicos y alteración de la roca huésped.**

La mayoría de los depósitos geotérmicos pueden ser clasificados en alguno de los seis tipos o categorías siguientes:

**A. Sistemas hidrotermales dominados por vapor.** Este tipo produce vapor supercalentado y menores cantidades de otros gases (por ejemplo, dióxido de carbono, ácido sulfúrico, y amoníaco), pero poca o ninguna agua líquida.

Dentro del depósito asociado con la fuente geotérmica dominada por vapor, el vapor saturado y el agua coexisten, siendo la presión una función de la fase de vapor. En algunos casos, el decrecimiento de la presión con la perforación y la producción y el calor contenido en las rocas secas y es transferido al fluido saturado en vapor, generando un vapor supercalentado.

Las salmueras calientes probablemente existen bajo los depósitos dominados por vapor, pero la perforación no ha confirmado esto. Actualmente, en Japón e Italia, se están trabajando en proyectos que tienen como objetivo descubrir los yacimientos que se supone existen a grandes profundidades (4 a 6 km) por debajo de yacimientos en explotación, por ejemplo Larderello. En algunos casos los depósitos de vapor pueden presentarse como una capa en la parte superior de los sistemas hidrotermales dominados por líquido. Entre las manifestaciones superficiales más importantes en estos sistemas tenemos a las fumarolas.

Algunos ejemplos de los campos geotérmicos dominados por vapor se presentan en los Geysers y La Caldera Valles (EUA), Larderello y Monte Amiata (Italia), y Matsukawa (Japón), (Tatsch, 1981).

**B. Sistemas hidrotermales dominados por líquido.** Los sistemas dominados por líquido son aproximadamente veinte veces más abundantes que los dominados por vapor. El agua en los sistemas dominados por líquido tiene temperaturas que pueden exceder las temperaturas de ebullición en la superficie. Los manantiales calientes son las manifestaciones superficiales más importantes presentes en estos sistemas. En la mayoría de éstos el agua descargada en la superficie es una solución acuosa diluida de sodio, potasio, litio, cloro, bicarbonato, sulfato, borato, sílice y constituyentes menores.

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

C. Sistemas magmáticos. En este tipo, la energía térmica se encuentra en la roca líquida o casi líquida con temperaturas que varían de 600°C a 1500°C. Estos sistemas están relacionados con una zona de actividad volcánica reciente. Ejemplos de estos sistemas se encuentran en Hawái y Alaska en EUA e Indonesia.

D. Sistemas geopresurizados. Algunas cuencas sedimentarias profundas se caracterizan por presentar capas intercaladas de arena y arcilla, de edad Terciaria y compactadas bajo profundidades de 2 a 3 km. La presión de los fluidos intersticiales genera parte de la sobrecarga, lo cual sugiere el término geopresión.

Los sistemas geotérmicos geopresurizados ocurren en regiones donde el flujo de calor normal es atrapado por capas de arcilla impermeables aisladas en un geosinclinal de subsidencia rápida. Las presiones profundas en estos sistemas son significativamente más grandes que las presiones hidrostáticas y pueden alcanzar la presión litostática. El agua en estos sistemas geopresurizados no es meteórica sino que parece ser producida por compactación y deshidratación de los sedimentos marinos.

Los sistemas geopresurizados ocurren dentro de todos los continentes y son normalmente encontrados en cinturones casi continuos. Se encuentran comúnmente limitados por fallas regionales y se extienden por cientos de kilómetros. Un ejemplo de éstos se tiene en la Cuenca del Golfo de México. Los depósitos geopresurizados que han sido analizados se encuentran ampliamente distribuidos en todos los continentes, excepto Oceanía (Tatsch, 1981).

E. Sistemas de "rift". Están asociados con estructuras de tipo "rift" que se han desarrollado en áreas de tensión cortical. Hay básicamente tres tipos de estos sistemas, dependiendo si la estructura tipo rift ocurre dentro de un área oceánica, de isla o continental.

Los primeros existen en varias partes de los océanos, los del tipo islándico incluyen Islandia y Nueva Zelanda. Tipos continentales de este sistema incluyen el este de África, el Golfo de California, el Lago Baikal, y la Antártida (Tatsch, 1981).

F. Sistemas de roca-seca caliente. En este tipo, el calor está almacenado casi enteramente dentro de rocas impermeables de muy baja porosidad. Para extraer la energía dentro de estos sistemas de roca caliente-seca, se hace circular un fluido para promover el intercambio de calor entre las rocas calientes y así transportarlo hacia la superficie (Tatsch, 1981); por lo que este tipo de sistemas son inducidos. Por ejemplo, en algunas zonas de EUA.

Dentro de las áreas geotérmicas de alta temperatura la interacción de las rocas encajonantes con el agua caliente o vapor da lugar a una serie compleja de reacciones de desvitrificación, recristalización, disolución y depositación, las cuales son denominadas como alteración hidrotermal de la roca huésped.

Los patrones de alteración (ver tabla 1) han sido estudiados con detalle en una variedad de sistemas geotérmicos. La paragénesis mineralógica de alteración varía con la temperatura, la presión, el tiempo de reacción, la composición del fluido y la mineralogía primaria de la roca encajonante. Las rocas impermeables están generalmente menos alteradas, incluso en las zonas de temperatura más alta, su alteración es mínima en comparación con las rocas permeables. La mayoría de los sistemas geotérmicos muestran cambios laterales y verticales en la paragénesis mineral de alteración y tienen una variación considerable en su distribución espacial. Ya que los

sistemas geotérmicos se desarrollan a través del tiempo, las variaciones temporales en las posiciones de los canales y en el nivel freático pueden causar complejas superposiciones en la paragénesis o conjuntos de alteración (Silberman y Berger, 1985). Las concentraciones de dióxido de carbono y ácido sulfhídrico en las aguas tienen un importante control sobre el tipo de mineralogía secundaria (Ellis y Mahon, 1977).

El orden decreciente de susceptibilidad de los constituyentes minerales formadores de roca a la alteración hidrotermal se presenta en la naturaleza de la manera siguiente: vidrio volcánico, magnetita, hiperstena, biotita y plagioclasa. El cuarzo secundario se deposita por la sobresaturación de la solución caliente, pero los cristales primarios frecuentemente permanecen en la roca alterada (Ellis y Mahon, 1977).

En la mayoría de las áreas de alteración hidrotermal las rocas muestran un zonamiento con el incremento de la profundidad, temperatura, porosidad y el cambio de condiciones químicas. Usualmente hay una zona superficial de alteración argílica donde las aguas ácidas se forman por la oxidación del ácido sulfhídrico a ácido sulfúrico. Caolín, alunita, azufre y yeso son comunes en esta alteración superficial. En algunos campos la alteración argílica persiste a niveles más profundos (Ellis y Mahon, 1977).

El tipo de alteración en niveles profundos en áreas de alta temperatura está caracterizado por una paragénesis mineral propilitica o potásica. En zonas poco profundas más frías, las zeolitas y montmorillonitas son productos de alteración comunes. En áreas de rocas volcánicas los procesos de alteración hidrotermal son generalmente de hidratación, carbonatación, silicificación y formación de sulfuros. Sin embargo, en áreas de rocas sedimentarias la alteración a temperaturas más altas puede a veces resultar en la pérdida de agua y dióxido de carbono presente en la roca. (Ellis y Mahon, 1977).

En la paragénesis mineralógica hidrotermal, el zonamiento más característico presenta el siguiente patrón: un sinter superficial, sobreyaciendo a una roca silicificada, la cual se encuentra en contacto lateral con un conjunto argílico o filico, el cual lentamente da lugar a una roca propilitizada profunda. En detalle, la mineralogía de alteración ocurre en proporciones irregulares y hay un cambio gradacional en sus proporciones relativas bajo el contacto aluvión-volcánico (Silberman y Berger, 1985).

A temperaturas y presiones constantes (en equilibrio), al menos siete fases pueden ser esperadas a coexistir con agua en las rocas alteradas, sin considerar a los minerales de Fe y S entre los constituyentes principales. Por ejemplo, en el campo geotérmico de Salton Sea (EUA), a 300°C la paragénesis mineral de cuarzo, epidota, clorita, feldespato potásico, albita, mica potásica y calcita se forma por la recristalización de cuarzo detrítico, feldespato, arcillas y carbonatos de los sedimentos originales (Ellis y Mahon, 1977).

En muchos sistemas geotérmicos, los datos de núcleos de pozos muestran que la alteración es más intensa (y las temperaturas más altas) alrededor de las fisuras donde se tiene los flujos de agua caliente. La mineralogía varía a conjuntos de temperatura más baja al alejarse de estas fisuras. En las fisuras es posible encontrar cuarzo, feldespato potásico y calcita o wairakita en zonas donde ocurrió la ebullición (Ellis y Mahon, 1977).

En situaciones ideales, tanto la alteración como las estructuras asociadas son reconocibles y su distribución puede ser cartografiada, dando alguna indicación de la extensión de la actividad hidrotermal y su intensidad (Simmons, 1994).

## **II.2. Características de los fluidos y minerales de alteración asociados a los sistemas hidrotermales.**

Los manantiales asociados a los sistemas hidrotermales y volcanes son ligeramente variables en sus composiciones químicas, variando de aguas muy diluidas a verdaderas salmueras, y de pH casi neutro a extremadamente ácido.

El conocimiento del comportamiento químico de estos fluidos viene del estudio de los productos mineralógicos de los sistemas activos. Los sistemas hidrotermales activos contienen ambientes análogos a los depósitos de baja temperatura. La razón de esto es que los depósitos de baja temperatura y los sistemas hidrotermales activos ocurren en ambientes tectónicos similares, tienen similares litologías volcánicas encajonantes (y composiciones químicas) y exhiben similares distribuciones espaciales de paragénesis hidrotermal (Simmons, 1994). Los sistemas en los cuales los fluidos de baja sulfidación circularon fueron perforados y explotados para producir energía geotérmica, (a éstos nos referiremos en este trabajo) aunque también existen los fluidos de alta sulfidación asociados a sistemas hidrotermales con una proporción importante de componentes magnéticos.

### **II.2.1. Fluidos de baja sulfidación.**

En las partes exploradas de los sistemas hidrotermales, tres composiciones de fluidos diferentes existen, de las cuales la más importante es el agua clorurada, por su asociación a la depositación de los sinters característicos en los ambientes geotérmicos.

Las aguas cloruradas se forman a través de la incorporación de gases magnéticos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ) y la interacción fluido-mineral (Giggenbach, 1988). El componente acuoso dominante en las descargas superficiales es el cloro, pero antes de la ebullición el fluido puede contener concentraciones significativas de  $\text{CO}_2$ .

Los cationes acuosos más importantes son sodio, potasio, calcio y magnesio. Sus concentraciones son controladas por la interacción de los fluidos con feldespatos, arcillas y carbonatos de calcio y magnesio. La concentración de sílice disuelto está relacionada con la temperatura dependiendo del equilibrio con cuarzo arriba de  $200^\circ\text{C}$ . Debido a la lentitud de las reacciones cinéticas, el sílice amorfo (en vez de cuarzo) precipita de manantiales clorurados no diluidos para formar depósitos de sinter característicos (Simmons, 1994).

Otro tipo de fluido son las aguas bicarbonatadas, las cuales contienen altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  disuelto, separado del agua clorurada por la ebullición profunda en el sistema. En terrenos con relieve topográfico alto, las aguas bicarbonatadas en acuíferos poco profundos pueden extenderse lateralmente a varios kilómetros de la zona de flujo principal. Los minerales arcillosos y los carbonatos están comúnmente asociados con estas aguas, las cuales son ligeramente ácidas y cercanas a una saturación de calcita. Donde las aguas bicarbonatadas alcanzan la superficie depositan travertino.

Por último, las aguas sulfatadas ácidas son aguas calentadas por vapor y se forman arriba del nivel freático donde el  $\text{H}_2\text{S}$  se oxida a sulfato para formar ácido sulfúrico. Los componentes de las rocas, especialmente el vidrio volcánico, son fácilmente disueltos por aguas sulfatadas-ácidas, así su expresión superficial está asociada con tierras de colapso. Los minerales de alteración asociados (ver tabla 1) incluyen caolinita, alunita y sílice amorfo. (Simmons, 1994).

<b>Terminología.</b>	<b>Características de la alteración.</b>
<b>Silícica.</b>	Deposición de sílice criptocristalino a sílice opalino y cuarzo. Roca encajonante silicificada; amatista o calcedonia típicos de vetas.
<b>Potásica.</b>	Consiste de feldespato potásico y leucmicas +/- pirita.
<b>Sericítica.</b>	Consiste de sericita + cuarzo + pirita; con adición de feldespato potásico.
<b>Argilica.</b>	Caolín y minerales del grupo de la montmorillonita. Frecuentemente zonada, con caolinita cerca de las vetas y montmorillonita lejos de ellas.
<b>Argilica avanzada.</b>	Dickita, caolinita, pirofilita, usualmente sericita, cuarzo; frecuentemente alunita, pirita, turmalina, topacio, arcillas.
<b>Propilítica.</b>	Caracterizada por clorita, albita, epidota, carbonatos +/- pirita, óxidos de Fe y poca sericita. Típicamente una alteración regional.

Tabla 1 Terminología petrográfica para paragénesis de alteración, modificada de Meyer y Henley, 1967.



### III. Geología de la Zona de estudio.

La zona que se estudió en este trabajo ha sido ampliamente analizada por una gran variedad de investigadores, sobresaliendo los trabajos realizados por Mahood (1981a y b), Mahood y Truesdell (1983), Gutiérrez Negrín (1991), Leal Hernández (1988), JICA (1989), entre otros autores; sus consideraciones geológicas sirvieron de base para este capítulo, además de la corroboración mediante las visitas de campo al lugar de interés y los análisis petrográficos realizados.

#### III.1. Localización y tipo geológico.

La Faja volcánica Transmexicana (FVTM) cruza México entre las latitudes 19° y 21° norte. En ella ocurre la mayor parte de la actividad volcánica histórica y actual en México: estratovolcanes, campos de conos cónicos, ocurrencias aisladas de volcanismo riolítico, y centros silíceos mayores. Un potencial geotérmico grande está relacionado con esta actividad volcánica. El campo geotérmico de La Primavera está asociado a un gran centro silíceo localizado en el sector occidental de la FVTM, justamente a 5 km al occidente de la ciudad de Guadalajara (figura 1). Es además conocida como Sierra La Primavera, por los domos riolíticos asociados con esta caldera pleistocénica tardía constituyendo variantes de montañas locales que sobresalen en el área de estudio (Alatorre Zamora y Campos Enriquez, 1992).

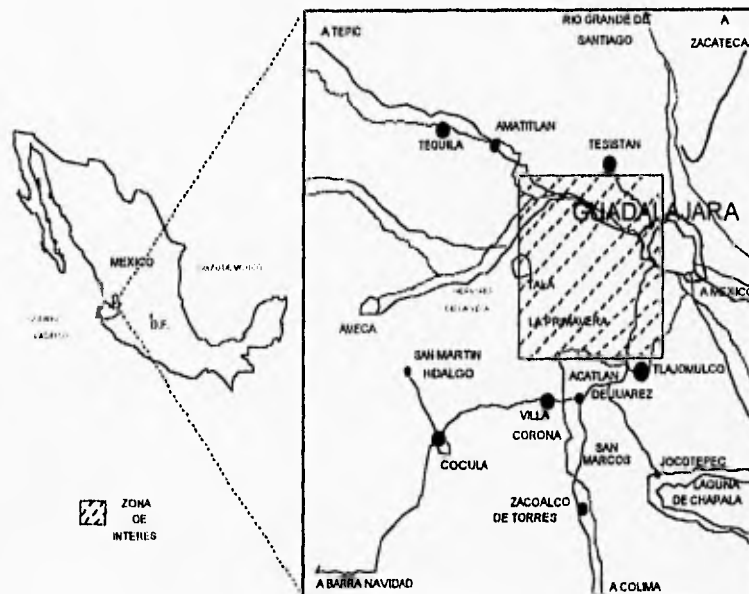


Figura 1. Localización del Campo geotérmico de La Primavera.

Esta área es interesante desde por lo menos dos puntos de vista (figura 2). El primero de ellos, la intersección de la FVTM y la Sierra Madre Occidental (SMO) aquí. Segundo, el sector más occidental de la FVTM incluye tres grabenes regionales: el graben de Colima, con una longitud aproximada de 80 km y una orientación norte-sur; el graben de Chapala comprendiendo aproximadamente la misma distancia en una dirección este-este; y el graben de Tepic, con una orientación noroeste-sureste y una longitud de 180 km. La intersección de estas tres estructuras parecen constituir un incipiente punto triple asociado a los fenómenos tectónicos que actúan en la ribera este del Océano Pacífico actualmente (Luhir y Carmichael, 1981). La caldera La Primavera esta localizada aproximadamente a 50 km al norte del punto de intersección. La fábrica estructural regional está dominada por el sistema noroeste-sureste asociado con el graben de Tepic y en la porción sureste esta presente el sistema este-oeste asociado con el graben de Chapala (Campos-Enriquez et al, 1987). Localmente, en la caldera existe un sistema noreste- suroeste de fallamiento normal (JICA, 1989).

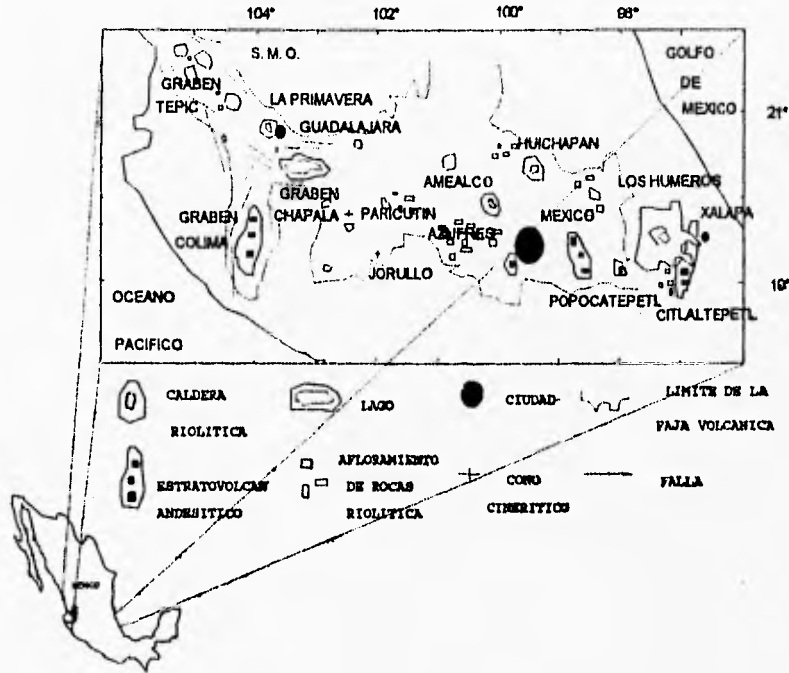


Figura 2. Geología regional del área de estudio comprendida por la FVTM y parte de la SMO.

## III.2. Geología.

Debido a su potencial geotérmico la zona de La Primavera, ha sido motivo de un gran número de estudios, entre los cuales los de tipo geológico representan una parte importante para el entendimiento del campo. La recopilación bibliográfica de éstos, constituyó la base para el estudio de los trabajos geológicos presentados a continuación, además de nuestra contribución con los análisis petrográficos realizados en el área. Las dataciones propuestas para las unidades litológicas se basaron en las realizadas por Mahood y Drake (1982), por el método de K-Ar.

### *Lavas de precaldera.*

La historia eruptiva reciente en el campo Geotérmico de La Primavera comienza hace 145,000 años, cuando las primeras lavas de la Sierra La Primavera fueron derramadas. Estos domos porfíricos y afíricos y flujos afloran en dos áreas (figura 3), una en la parte sur y otra en el noroeste de la zona estudiada.

Las lavas porfíricas riolíticas, así como las subsecuentes extravasadas en la Sierra La Primavera, contienen aproximadamente 10% de fenocristales con sanidino sódico >= cuarzo >> ferrohedenbergita > fayalita > ilmenita > titanomagnetita. Como observamos en el estudio petrográfico K, una roca característica de éstas lavas de precaldera, presenta una textura piroclástica, con una matriz de vidrio con cuarzo y sanidino encontrándose entre los más importantes fenocristales en ésta matriz.

Las lavas de precaldera son composicionalmente el grupo eruptivo más heterogéneo. Las tres unidades del área norte, para las cuales las edades relativas son conocidas, no muestran una evolución química sistemática con el tiempo, además de que sus contactos estratigráficos se muestran muy confusos (Mahood, 1981a).

### *Toba Tala.*

Hace aproximadamente 95,000 años, ocurre la formación de 20 km<sup>3</sup> de flujos de cenizas de la erupción de la Sierra La Primavera, que se vaciaron hacia las cuencas de los alrededores, cubriendo cerca de 700 km<sup>2</sup>; estos flujos reciben el nombre de Toba Tala. Según López Hernández (1991), los datos nuevos obtenidos por la perforación sugieren un total de 32 km<sup>3</sup> arrojados durante esta violenta erupción.

La Toba Tala es de composición riolítica ligeramente zonada desde una porción peralcalina, a una porción metalumínica final. Como observamos en los estudios petrográficos C, D, E y O, tenemos una roca con una textura piroclástica con fragmentos de roca y vidrio, identificamos cristales de sanidino con su macla característica, cuarzo primario y una matriz vítrea desvitrificada, en algunos casos argilizada y silicificada. Además, de que notamos la presencia de clorita como producto de alteración de los ferromagnesianos. La Toba Tala consiste de muchos flujos de cenizas pequeños que son agrupados en tres unidades fácilmente reconocibles (Mahood, 1981b).

En la Toba Tala, la mayoría de los elementos mayores permanecen aproximadamente constantes a través del volumen extravasado, y la mayoría de los elementos traza, varían un poco más que un factor de dos.

Na, Rb y Zn se encuentran enriqueciendo la porción que se emplazó primero de la Toba Tala, mientras que el K y Ca están enriqueciendo la parte extravasada final, además Mahood, 1981b; reportó una disminución en tierras raras ligeras y un aumento de tierras raras pesadas en el techo de la caldera (Mahood, 1981b.).

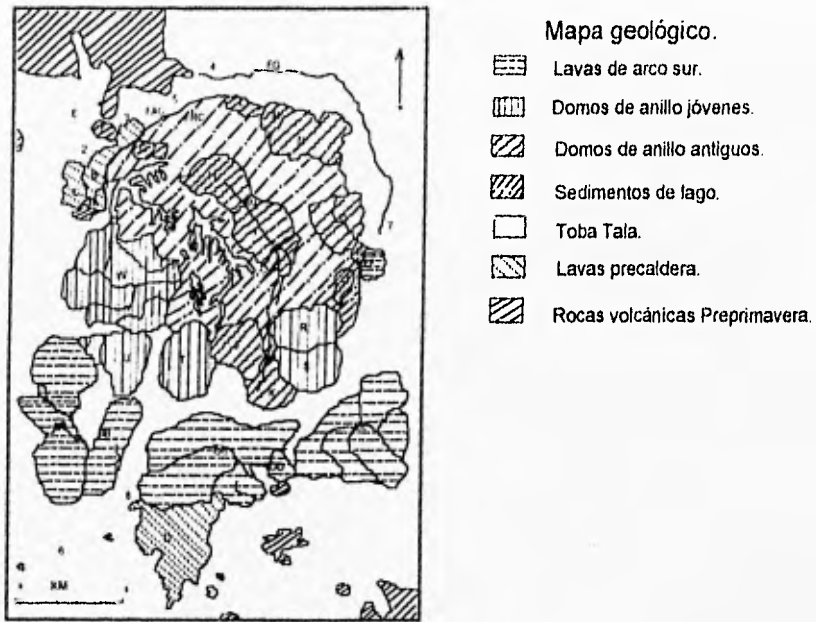


Figura 3. Geología local de la Sierra La Primavera. (tomada de Mahood, 1980). Las letras se refieren a los nombres de los centros eruptivos y a los rasgos geológicos más importantes en la zona, mientras que los números se refieren a los rasgos culturales.

Explicación de las claves de la figura 3.

A: domo Río Salado; B: flujo Cañón de las Flores; C: domo Mesa León; D: Grupo Arroyo Saucillo. E: domo Mesa El Chiquihuitillo; F: domo Mesa El Burro; G: domo Cerro Chato; H: domo compuesto Cerro Alto; I: domo compuesto Mesa El Nejahuete; J: domo Cerro Tule; K: domo El Madroño; L: domo Pinar de La Venta; M: domo Arroyo La Cuartilla; N: domo Mesa La Lobera; O: domo Cerro el Capulin; P: domo Dos Coyotes; Q: domo La Pila; R: domo Ixtahuatonte; S: domo La Cuesta; T: domo El Culebreado; U: domo La Puerta; V: domo Arroyo Las Animas; W: domo El Pedernal; X: Cerro Totepec; AA: Cerro San Miguel; BB: flujo Llano Grande; CC: cerro Las Planillas; DD: domo Arroyo Colorado; EE: Cerro Tajo; FF: domo El Colli; FAC: Falla de Anillo Caldérico; FRC: Falla Río Caliente; FN: Falla El Nejahuete; FG: Falla La Gotera; I: 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.

El primer emplazamiento contiene pómez afírica blanca y constituye cerca del 90% del volumen total de la Toba Tala. Ocurre como flujos de cenizas de intracaldera dentro de la propia Sierra La Primavera y como fragmentos no consolidados, aproximadamente de 60 m de espesor, rellenando flujos extensos en cuencas de los alrededores.

En la mayoría de los afloramientos, estos flujos extensos se caracterizan por ser vítreos y poco alterados. Sin embargo, la porción este de la Toba Tala, presenta muchos kilómetros cuadrados en su superficie con marcas de chimeneas y paredes poligonales que se extienden hacia abajo hasta 4 m de profundidad. La toba con estas características está alterada por vapor y presenta clinoptilolita, el cual es uno de los pocos minerales de alteración reportados por Mahood, (1981a).

El segundo miembro de la Toba Tala, tiene cerca de 10 m de espesor y está caracterizado por pómez afírica blanca y lapilli pumicítico gris conteniendo muy poco cuarzo y sanidino, este lapilli representa la mezcla de los dos magmas. A pesar de su color más oscuro, el lapilli pumicítico gris es de la misma composición que la del lapilli pumicítico blanco en el sobreyacente tercer miembro.

El tercer miembro de la Toba Tala tiene 5-10 m de espesor y está formado por lapilli pumicítico blanco, conteniendo menos del 1% de cuarzo y sanidino, en una matriz de ceniza rosa. En muchos lugares, el tercer miembro muestra intercalación de flujos de ceniza laminados y capas de caída de gravedad.

#### *Colapso de la caldera.*

El segundo y tercer miembro de la Toba Tala se localizan solamente en la parte central de la Sierra La Primavera, y no son encontrados en los extensos flujos en las cuencas de los alrededores. Esto sugiere que el colapso de la zona del techo de la cámara magnética (150-500 m sugerido por Mahood, 1981a), se originó mientras el primer miembro de la Toba Tala estaba todavía siendo extravasado, así que los dos miembros más superiores se encontraron contenidos totalmente dentro de la cuenca de colapso.

El colapso de la caldera no ocurrió como pistón a lo largo de la fractura de anillo definida. Los rasgos de una falla de anillo están presentes al occidente del Río Caliente, donde las lavas de precaldera Río Salado y Cañón de Las Flores se truncan. A lo largo de la mayor parte de la

circunferencia de la cénica, el colapso ocurrió como una serie de escalones de falla o por un combamiento descendente de la supuesta zona del techo de la cámara magnética. Aunque en La Primavera no existen desniveles importantes que permitan detectar a primera vista una caldera (Demant y Vincent, 1978), los rasgos anteriores lo evidencian.

#### *Sedimentos del lago de la caldera.*

La caldera se llenó con agua, y los sedimentos empezaron a ser depositados sobre la superficie de la Toba Tala. Estos sedimentos consisten principalmente de capas de 15 a 50 cm de espesor de estratificación planar y cruzada con un pequeño ángulo formadas de ceniza gruesa y lapilli pumicítico que muestran una graduación normal repetitiva cada metro aproximadamente con algo de erosión de las cimas de estratificación cruzada de las secuencias, las cuales parecen estar saturadas de flujos pumicíticos turbidíticos. La fuente de esta pómez parece ser la erosión de pequeñas islas de Toba Tala dentro del lago poco profundo y los depósitos retrabajados de caída de gravedad posteriores a la Toba Tala.

El espesor de esta secuencia pumicítica basal varía de 0-25 m debido a la topografía pre-existente en el piso de la caldera, pero en todas partes la cima de la sección es marcada por una capa de ceniza blanca fina de 30 cm de espesor.

#### *Horizonte de pómez gigante.*

Posteriormente a los eventos descritos, tuvo lugar un evento espectacular de sedimentación: un horizonte de 3-13 m de espesor de bloques de pómez gigante unidos por una matriz de ceniza diatomeacea fueron depositados en los 110 km<sup>2</sup> del lago.

Los bloques de pómez varían de 0.3 a 6 m y son conuamente uniones columnares en patrones radiales toscos y tienen márgenes botroidales vagos. En el estudio petrográfico L, tenemos que este horizonte se caracteriza por una matriz de vidrio de composición ácida, en la cual observamos además de fenocristales de cuarzo y sanidino, algunos de hornblenda. La matriz de cenizas está finamente laminada y las láminas están deformadas a lo largo de los bloques de pómez. La distribución de los tamaños de partículas es bimodal; el lapilli pumicítico de tamaño intermedio es raro. El carácter único de este depósito formó una importante capa bien marcada dentro de la secuencia estratigráfica del lago.

Se detectó que los bloques de pómez gigante se formaron cuando las lavas pobres en fenocristales se derramaron en la mitad del lago poco profundo. Los bloques flotaron sobre la superficie del lago y saturándose eventualmente con agua se sumergieron lentamente a la base del lago, donde las finas cenizas acumuladas por el viento de los planos de los alrededores de la Toba Tala, y la diatomita se acumularon como sedimentos ligeramente laminados. El horizonte de pómez gigante selló las fallas en la Toba Tala y en los sedimentos pumicíticos sobreyacentes, raramente se encuentra cortado por fallas, lo que muestra que el fallamiento relacionado al colapso de la caldera cesó durante el tiempo en el que fue depositado.

#### *Domos centrales.*

Un domo se emplazó en la parte más baja de la Mesa 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 de 1% de fenocristales, en comparación a

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).

Se sugiere que la Toba Tala puede haberse creado de una abertura central cerca del lugar donde se encuentra el domo central sur debido a la semejanza en la composición química de la Toba Tala de la porción final extravasada con la del domo central sur y la presencia de una coignimbrita de depósitos de caída tardíos (bombas de toba parcialmente soldada fracturada; que parecen ser fragmentos de una de Toba Tala todavía plástica al momento de formarse, arrojada de las paredes del conducto para enfriarse y constituir la entrada de los flujos de ceniza a la superficie).

Posteriormente, un domo conteniendo 10% de fenocristales es extravasado a través de la parte media del lago. La base de este domo central norte sobreyace a las brechas de pómez subaéreas sobre la cima del horizonte de pómez gigante. Las composiciones químicas del horizonte de pómez gigante en roca total y en los fenocristales es generalmente intermedia entre las composiciones de los domos central norte y sur (Mahood, 1981a).

#### *Domos de anillo más antiguos.*

La sección estratigráfica que sobreyace al horizonte de pómez gigante es bastante variable. En algunas zonas se ha observado que los sobreyacen por lo menos 10 m de pómez estratificada antes de que la sección llegue a ser dominada por capas diatomeáceas y de fina ceniza blanca. Las capas lacustres pumiciticas parecen ser el resultado de erupciones de caída, las cuales precedieron el emplazamiento de un nuevo grupo de domos (Mahood, 1981a).

Los domos de anillo más antiguos contienen aproximadamente 10% de fenocristales y representan casi 5 km<sup>3</sup> de magma. Estos erupcionaron a lo largo de dos arcos concéntricos: unos a lo largo de la fractura de anillo en el margen noreste del lago y los otros a través de la parte media del lago. Localmente, la intrusión de estos domos deformó y levantó los sedimentos de lago, incluyendo el horizonte de pómez gigante.

Todo lo anterior, desde la erupción de la Toba Tala hasta la formación de los domos de anillo más antiguos ocurrió en un período de 5,000-10,000 años.

La porción final extravasada de la Toba Tala es composicionalmente semejante a la del domo central sur, sin embargo el domo central norte y los domos de anillo más antiguo son ligeramente más máficos en composición. Esto sugiere continuidad en los gradientes composicionales de la parte de la cámara magmática que se extravesó explosivamente formando desde la Toba Tala a las lavas más recientes posteriores a la caldera (Mahood, 1981a).

Así, se tiene una cámara magmática zonada composicionalmente, lo que refleja mecanismos de diferenciación contrastantes y condiciones en la zona de techo que la enriquecieron en volátiles para formar la Toba Tala y después el magma más pobre en volátiles, ligeramente más caliente y más profundo erupción para formar los domos de anillo más antiguos (Mahood, 1981a).

La sedimentación en el lago de la caldera continuó después del emplazamiento de los domos de anillo más antiguos, con ceniza fina y material diatomáceo dominando la sección. La depositación de aproximadamente 30 m de estos sedimentos de grano fino indican un período de quietud volcánica de 5,000 años.

Según Mahood (1977), la presencia de granos finos en los sedimentos del lago y la virtual ausencia de despojos líticos derivados de los alrededores de la caldera sugiere que en una etapa anterior a la formación de la caldera toda la región se elevó, por lo tanto los arroyos drenaron hacia afuera del futuro sitio de la Sierra La Primavera. Esto podría representar un ejemplo de intumescencia regional durante el emplazamiento gradual y crecimiento de la cámara magmática silíceo somera, lo que se identifica como el estado 1 de un ciclo de formación de una caldera de resurgimiento (resurgent cauldron).

#### *Domos de anillo más jóvenes.*

Hace 75,000 años un nuevo grupo de domos se formó en la margen sur del lago. Lavas africas y parfricas ríalticas fueran derramadas, constituyendo un volumen aproximado de 3 km<sup>3</sup> de magna.

La escasez de tefra químicamente similar a los domos de anillo más jóvenes, dentro de la sección lacustre o en los alrededores de la Sierra La Primavera, sugiere que hubo relativamente poca actividad piroclástica asociada con el emplazamiento de estos domos.

#### *Levantamiento.*

El levantamiento que produjo la Sierra La Primavera llevó a término la sedimentación lacustre hace 60,000 años aproximadamente. La deformación durante el levantamiento se concentró en las márgenes del lago. El levantamiento fue asimétrico en la caldera y fue más grande en la margen sur del lago, así una componente norte esta superimpuesta sobre las buzamientos radiales de los sedimentos del lago. De acuerdo a los datos de Mahood (1981b), y las observaciones realizadas por Demant y Vincent (1978), se infiere un levantamiento de al menos 250 m. La notable escasez de fallas que cortan los sedimentos sobre el horizonte de pómez gigante dentro de la porción central del lago indican que el levantamiento fue como un pistón; el bloques de caldera subió aparentemente como una unidad simple excepto en sus márgenes.

#### *Lavas de arco sur.*

Comienzan a producirse hace aproximadamente 60,000 años, se ha medido un volumen de 7 km<sup>3</sup> de magna derramado como flujos africos y domos. En nuestros análisis petrográficos M y N, tenemos dos ejemplos de estas lavas de arco sur, en la cual podemos observar la presencia de un vitrafiro fresco y una riolita, la cual presenta una matriz vítrea casi en su totalidad argilitizada. Contemporáneamente a la extrusión de estos domos y flujos hubieron erupciones de pómez de caída libre, las cuales cubrieron la sección estratigráfica del lago, y un pequeño flujo de cenizas se extendió aproximadamente 2.5 km<sup>2</sup> en las colinas del norte de Tierra Blanca.

Las lavas de arco sur son generalmente más jóvenes hacia el este. El Cerro El Colli es químicamente distinto del resto de las lavas de arco sur, y su posición en la orientación composicional definida por los domos postcaldera indica que es la unidad eruptiva más joven en la Sierra La Primavera.



Unidad litológica. Descripción.	Columna estratigráfica.			
	Profundidad Cima	Promedio (m) Base	Espesor (m) Promedio Edad	
Sedimentos lacustres y pómez.	0	33	35,86	Cuaternario (<70000 años)
Iguimbritas (Toba Talu)	33	399	376,09	Cuaternario ( 95000 años)
Riolitas superiores	399	463	87,6	Cuaternario ( 120000 años)
Andesitas y Tobas líticas	463	1939	1380,655	
Riolitas inferiores	1939	2008	87,4	Mioceno-Plioceno (>2 millones de años)
Andesitas con escasos basaltos	2008	2780	812,395	
Basamento granítico a granodiorítico	2780	?	?	Mioceno Tardío (>7.3 millones de años)

Tabla 2. Columna estratigráfica de la Sierra La Primavera (elaborada a partir de los datos de los pozos perforados, según Gutiérrez Negrín, 1991).

### III.3. Manifestaciones termales.

Las manifestaciones termales en La Primavera (las cuales podemos observar en la figura 4) están asociadas con tres sistemas de fallas principales, los cuales consisten de fallas aproximadamente verticales que buzcan al occidente. El primer sistema puede ser trazado aproximadamente a 8 km al sur-suroccidente de La Gotera. El desplazamiento sobre esta falla alcanza un máximo de 100 m cerca del 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 está marcada por un escarpe irregular de 10 a 20 m en un arco de 13 km a lo largo de la margen noreste del complejo. Un manantial tibio de baja descarga emana de un escarpe en una tefra de caída de gravedad que sobreyace la Toba Tala en La Gotera.

El tercer sistema de fallas corre 9 km a través del centro del complejo en un arco suave, cóncavo al suroccidente. Sobre la parte superior de la Mesa El Nejahuete, su expresión es un escarpe de 5 a 10 m; sobre la pendiente sur de la mesa, la traza de la falla está marcada por un borde de lava pumicítica.

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 borde sur de la Mesa El Nejahuete con un máximo de 40 m de profundidad. Docenas de fumarolas emanan de los límites de fallas del graben (especialmente del lado suroccidental) y en lugares donde la roca está fuertemente alterada a minerales arcillosos por la acción del ácido sulfúrico producido por la oxidación del H<sub>2</sub>S. Cientos de pequeñas fumarolas surgen de la toba silicificada en un área conocida como Las Barrancas, en donde el flanco suroccidental del graben intersecta al contacto de la Toba Tala con los sedimentos sobreyacentes del lago. Aproximadamente a 1 km al norte, aisladas de estas emanaciones, existe la depositación de azufre de emanaciones de vapor en La Azufretera. Este lugar presenta una intensa alteración de tipo ácida y contiene un gran número de vigorosas fumarolas (Mahood et al, 1983).

Otras fumarolas se encuentran sobre el Cerro Las Planillas. Los manantiales calientes en el Bañerío Primavera y Agua Caliente emergen cerca del contacto de un flujo de obsidiana de precaldera y la Toba Tala. El Bañerío Cañón de Las Flores obtiene su agua caliente de un pozo profundo a 260 m, no se observan manifestaciones superficiales en esta zona (Mahood et al, 1983).

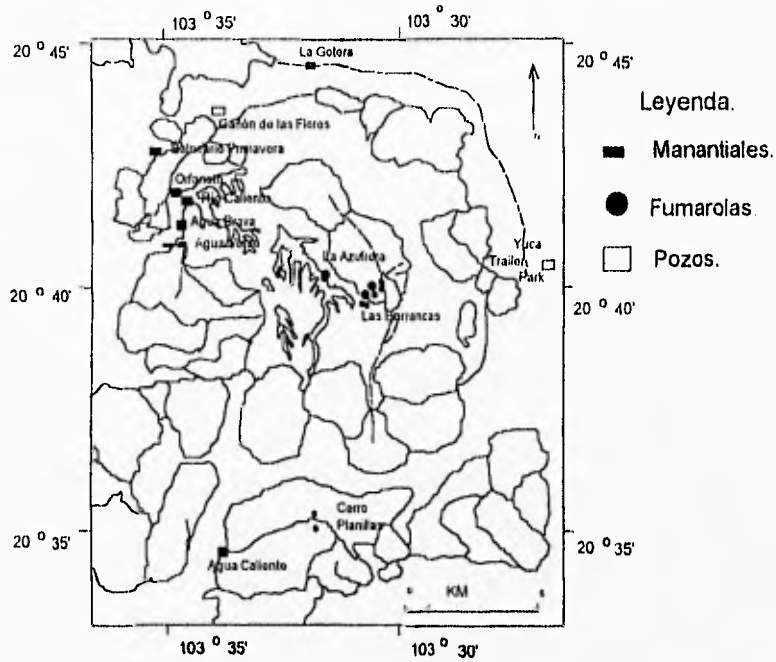


Figura 4. Mapa de las manifestaciones superficiales en La Primavera.

Otras fumarolas se encuentran sobre el Cerro Las Planillas. Los manantiales calientes en el Bañerío Primavera y Agua Caliente emergen cerca del contacto de un flujo de obsidiana de precaldera y la Toba Tala. El Bañerío Cañón de Las Flores obtiene su agua caliente de un pozo profundo a 260 m. no se observan manifestaciones superficiales en esta zona (Mahood et al. 1983).

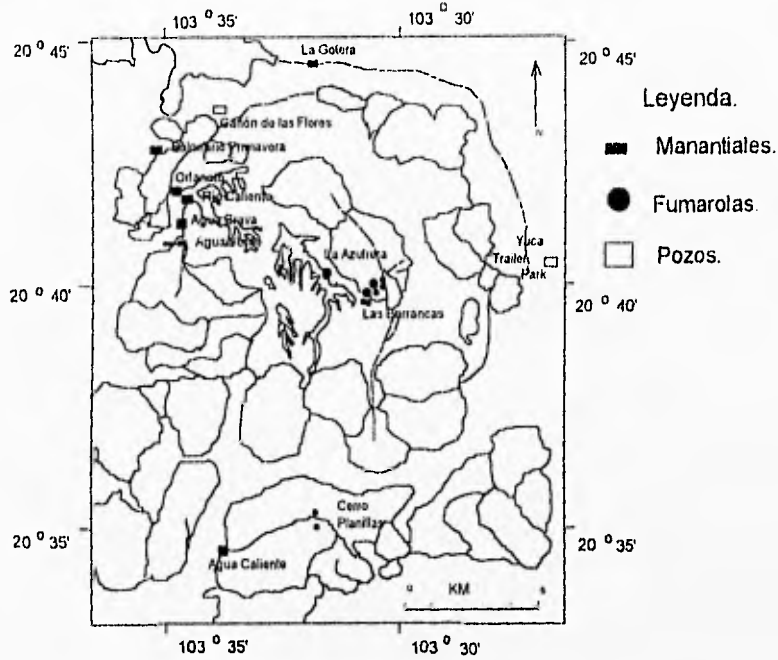


Figura 4. Mapa de las manifestaciones superficiales en La Primavera

## IV. Características geoquímicas de rocas frescas y rocas alteradas en La Primavera, Jal.

El siguiente estudio consistió en la comparación de análisis químicos de rocas frescas realizados por Mahood (1981b), y de análisis químicos de recortes y núcleos de pozos, tanto de rocas frescas como rocas alteradas, realizados para la creación de este trabajo consistente en elaborar una hipótesis del comportamiento de los elementos analizados en las rocas, y sus relaciones con los fluidos hidrotermales. Los datos de análisis químicos de pozos y manantiales para los fluidos fueron tomados de Gutiérrez Negrín (1991) y Mahood et al (1983).

### IV.1. Mineralogía primaria.

Los fenocristales en las unidades eruptivas porfíricas aflorantes en La Primavera varían de 1% a 15% por volumen. El sanidino sódico y cuarzo son los más abundantes, juntos comprenden aproximadamente el 97-99% de los fenocristales y el resto es ferrohedenbergita, fayalita e ilmenita, típicamente en proporciones de 50:10:1. La titanomagnetita es rara, el zircón y apatita están presentes en algunas unidades (ver análisis petrográficos en el Apéndice). De los análisis petrográficos realizados para este trabajo (ver Apéndice) se observa la presencia de biotita y hornblenda en las rocas que afloran en La Primavera además de los minerales reportados por Mahood (1981b).

<i>Mineralogía primaria</i>	
Mineral.	Características.
Cuarzo.	Granos cercanamente redondos de .3 a 2 mm de diámetro.
Sanidino.	Presenta inclusiones de vidrio frecuentes. Ligeramente maclado, granos tabulares de .5-2.5 mm de longitud. En ocasiones presenta inclusiones de ferrohedenbergita o fayalita. El sanidino en las lavas de precaldera y domos de anillo más jóvenes es más potásico que el sanidino de la Toba Tala, el del domo central sur, el del horizonte de pómez gigante y el de los domos de anillo más antiguos. El sanidino más sódico ocurre en el domo central norte.
Ferrohedenbergita.	Granos prismáticos de .7-1.2 mm de longitud, ligeramente pleocroico, verde a verde oscuro. Comúnmente contiene inclusiones de ilmenita.
Fayalita.	Ocurre en pequeños cristales redondeados, poco más grandes que .2 mm de diámetro. La mayoría de los granos contienen inclusiones de ilmenita y son bordeados por productos de alteración como hematita.
Ilmenita.	Ocurre como placas en ferrohedenbergita y fayalita, y raramente como fenocristales de .2 mm de diámetro.
Titanomagnetita.	La contienen solamente las lavas de precaldera. Además contiene inclusiones de zircón

Tabla 3. Resumen de la mineralogía primaria característica en las rocas aflorantes en el área (elaborada a partir de los trabajos de Mahood, 1981a).

En los análisis petrográficos realizados en recortes y núcleos de pozos (estudios petrográficos H, I, P, Q, R, S, T y U) de La Primavera, se observa la presencia de andesitas, tobas líticas y un basamento granodiorítico, las primeras tienen como mineralogía primaria característica la presencia de una matriz de microlitos rica en labradorita y andesina, y algunos fenocristales de augita y olivino en esta matriz. Por otro lado, las tobas líticas presentan características mineralógicas afines a las rocas de composición riolítica y andesítica, dependiendo de su posición estratigráfica en la columna, caracterizadas por la presencia de líticos tanto de composición intermedia como de ácida; observar los análisis petrográficos G, H, P y Q. Por último, el basamento granodiorítico se caracteriza por una matriz que presenta un intercrecimiento

intergranular entre los feldespatos y cuarzo, además de tener algunos fenocristales de biotita (ver Apéndice I).

#### IV.2. Composición química de rocas frescas en La Primavera, Jal.

Las siguientes aseveraciones se basan en los trabajos realizados por Mahood, 1981b: (tabla 4) y los datos aportados por JICA (1989).

	L. Precal.	Toba T.	Domos C.	Domos V.	Domos J.	Lavas A.S	C. El Colli
SiO <sub>2</sub>	74,89	74,17	75,32	75,02	75,443	76,485	76,745
TiO <sub>2</sub>	0,117	0,12	0,155	0,17	0,116	0,085	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,62	11,38	11,48	11,54333	11,23	11,67	11,735
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	1,76	1,80	1,78	2,06	1,78	1,48	1,31
MnO	0,045	0,05	0,05	0,07	0,05	0,04	0,04
MgO	0,0475	0,04	0,05	0,047	0,0467	0,03	0,025
CaO	0,2525	0,19	0,235	0,27	0,2067	0,232	0,265
Na <sub>2</sub> O	4,327	3,99	4,435	4,55	4,46	4,7	4,56
K <sub>2</sub> O	4,73	4,65	4,655	4,763	4,623	4,42	4,41
H <sub>2</sub> O	2,067	3,43	1,475	1,263	1,963	0,8425	0,845
F	0,1	0,1	0,085	0,09	0,093	0,1	0,1
Cl	0,105	0,13	0,095	0,093	0,1067	0,115	0,125
SUMA	100,05	100,06	99,815	99,94	100,116	100,2025	100,225
O=(F,Cl) <sub>2</sub>	0,065	0,07	0,055	0,057	0,06	0,07	0,07
Total	99,99	99,98	99,76	99,88	100,056	100,1325	100,155
Trazas (ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Rb	169	219,13	138	142	160	168	193
Zn	111	134,5	98	102	108	101	83
Co	0,17	0,39	nd	0,08	0,09	0,3	0,2
Y	65	97	63	47	53	50	47
Sc	0,96	0,63	0,91	1,06	0,71	0,69	1,10
Zr	454	550	602	682	584	379	228
Hf	13,6	16,4	14,3	15,2	14,7	11,3	8,9

Tabla 4. Análisis por fluorescencia de rayos X para muestras no alteradas (Mahood, 1981b).

Explicación de las claves de la tabla 4.

- L. Precal. Lavas de precaldera.
- Toba T Toba Tala.
- Domos C. Domos centrales.
- Domos V. Domos de anillo más antiguos.
- Domos J. Domos de anillo más jóvenes.
- Lavas A.S. Lavas arco superior.
- C. El Colli. Cerro El Colli.

Todas las unidades aflorantes de la Sierra La Primavera son riolitas ligeramente peralcalinas (~ 75% en peso de SiO<sub>2</sub> sobre una base anhidra). Aunque todas las unidades son similares en el grueso de la composición, se encuentran diferencias químicas sistemáticas que correlacionan su edad y modo eruptivo: las variaciones en elementos mayores son pequeñas, en contraste, las variaciones en elementos traza y menores son más grandes.

Los análisis por XRF (fluorescencia de rayos X) para Rb, Sr, Y, Zr, y Sc de 150 muestras de lava, lujos de ceniza, tefra de caída libre de La Primavera, así como análisis de microsonda electrónica de fenocristales y los análisis químicos-húmedos de algunas muestras (Mahood, 1981b), establecieron que:

*Evolución química de las lavas extravasadas.*

-Las lavas de precaldera no son idénticas. La Toba Tala está ligeramente zonada composicionalmente. El Cerro Alto y La Mesa El Nejahuete son domos compuestos formados por la erupción de lavas de diferentes composiciones. Los domos de anillo más antiguos son homogéneos químicamente y virtualmente idénticos uno a otro. Las composiciones de los domos de anillo más jóvenes varían ligeramente. Las lavas de arco sur son homogéneas e idénticas una a otra con la excepción del Cerro El Colli, el cual es químicamente distinto.

*Hidratación de la Toba Tala.*

-Las rocas pumicíticas 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 razones más altas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO que las obsidias densas (químicamente similares) de los grupos eruptivos correspondientes.

*Variación en la concentración de los elementos traza.*

-El aumento en la concentración de elementos como el Zr y el Hf se relaciona con un aumento de la peralcalinidad dentro de una serie co-magmática, siendo probablemente uno de los mejores indicadores de la peralcalinidad original del magma.

*Lavas de precaldera.*

Las lavas de precaldera son composicionalmente el grupo eruptivo más heterogéneo. Las tres unidades del área norte para las cuales las edades relativas son conocidas no muestran una variación química sistemática con el tiempo (Mahood, 1981a).

*Toba Tala.*

La Toba Tala que se encuentra zonada en su composición, varía de una parte ligeramente peralcalina en el inicio de la erupción, a una parte metalumínica al final de ésta.

En la Toba Tala la mayoría de los elementos mayores permanecen aproximadamente constantes a través del volumen extravasado y los elementos zonados fuertemente como el Y y Sc varían solamente por un poco más que un factor de dos.

Na, Rb y Zn están todos enriquecidos en la porción que se produjo primero de la Toba Tala, mientras que el K y Ca se observan enriquecidos en la parte derramada al final de este evento explosivo. Mahood (1981b) reportó una disminución en tierras raras ligeras y un aumento de tierras raras pesadas en las paredes del techo de la cámara magmática.

El comportamiento opuesto de Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O es común en un número de unidades eruptivas silíceas en todo el mundo. Los análisis químicos-húmedos demostraron que el TiO<sub>2</sub> se incrementa con respecto al tiempo, de 0.085 a 0.13%, mientras que el MnO y MgO son aproximadamente constantes en 0.04 y 0.04% respectivamente. Los valores de CaO varían de 0.14 a 0.25%, y muestran poca correlación con la posición estratigráfica en la toba. La alúmina permanece aproximadamente constante a través del volumen extravasado, pero el silice puede tener concentraciones menores en la porción extravasada al principio de este evento explosivo (Mahood, 1981a).

En lo referente a la presencia del arsénico en las rocas aflorantes en La Primavera, en principio se sabe que este elemento, de los análisis realizados por Mahood (1981a); no es producido por la lixiviación de la roca por los fluidos hidrotermales, el contenido de arsénico de

los fluidos hidrotermales proviene de una parte más profunda del yacimiento, ya que el límite de detección de arsénico de los análisis de Mahood es 9 ppm; de ahí que en principio todas las rocas superficiales en el campo geotérmico tienen cantidades menores a 9 ppm.

Del estudio de recortes realizados por JICA, (1989); se observa que el arsénico se encuentra en proporciones desde 3 o 4 ppm hasta casi 60 ppm, por lo que se supone que parte del arsénico concentrado en el fluido es precipitado en las fracturas de las andesitas, principalmente y en las riolitas más profundas, este arsénico es el que viaja hasta los manantiales superficiales. Además, estas rocas presentan contenidos altos de Hg (desde 0.01 hasta 0.5 ppb en promedio).

#### **IV.2.1. Cámara magmática que formó la Toba Tala.**

Al final del evento explosivo que formó la última porción de la Toba Tala, tenemos que desde el punto de vista químico el domo central sur es muy similar; en cambio con respecto al domo central norte y a los domos de anillo más antiguos es ligeramente menos máfica. Esto indica una continuidad en el gradiente composicional de la parte de la cámara magmática que erupcionó explosivamente para crear la Toba Tala y las lavas de posteriores a la caldera. Presumiblemente, se cree que los domos de anillo representan el taponamiento de porciones ligeramente más profundas de la cámara magmática zonada que produjeron también los flujos de cenizas.

Las variaciones de las concentraciones de la mayoría de los elementos traza son proporcionales a las porciones producidas al comienzo de la erupción de la Toba Tala y a la de los domos de anillo más antiguos. Mahood (1981b) observó que: Las tierras raras pesadas están enriquecidas en la pared del techo, mientras que las tierras raras ligeras están enriquecidas en los niveles más profundos de la cámara magmática. Sin embargo, ciertos elementos muestran un comportamiento opuesto: Zr y Hf disminuyen en la porción derramada al final del evento explosivo que produjo la Toba Tala y el domo central sur, pero se incrementan otra vez en el domo central norte y en los domos de anillo más antiguos. Similarmente, el Na<sub>2</sub>O disminuye en la porción extravasada al final en comparación a la porción formada primero de la Toba Tala y a las lavas inmediatamente posteriores al colapso. El Fe no presenta zonamiento en el flujo de cenizas (al igual que el Zr, Hf, y Na) y es más abundante en el domo central norte y en los domos de anillo más antiguos.

No hay semejanzas en la evolución de las composiciones de los fenocristales en las lavas derramadas inmediatamente después a la formación de la caldera. La ferrohedenbergita y la fayalita del domo central norte tienen un contenido de magnesio más alto y el sanidino es más sódico que en el domo central sur. Sin embargo, estas tendencias de los fenocristales, no se extienden en los domos de anillo más antiguos, lo cual al parecer representa la erupción de un magma ligeramente más profundo, más caliente y menos evolucionado de una cámara magmática zonada. Los fenocristales de ferrohedenbergita y de sanidino en los domos de anillo más antiguos son de composición intermedia en comparación a los domos central norte y sur.

#### *Evolución de la cámara magmática de La Primavera desde hace 95,000 años.*

Después de la erupción de los domos de anillo, hace aproximadamente 95,000 años, las lavas se caracterizaron por ser progresivamente más silíceas y menos peralcalinas. Los valores para MgO y MnO en los domos de anillo más antiguos son aproximadamente el doble que en las lavas derramadas recientemente, como el Cerro El Collí. Aunque hay algunas disminuciones en los álcalis debido a la movilidad en la hidratación posterior a la erupción, Na<sub>2</sub>O permanece aproximadamente constante mientras que el K<sub>2</sub>O decrece de 4.8 a 4.5% (libres de agua) con el tiempo (Mahood, 1981b).

Las composiciones de los fenocristales y de roca total en los domos de anillo más jóvenes son similares a las lavas de precaldera. Esto sugiere que, continuando con la erupción de la Toba

Tala, tomó aproximadamente 20,000 años para que hubiera un restablecimiento en las condiciones químicas del magma, de tal forma que fueran similares a las que tuvo durante la erupción de las lavas de precaldera. En aproximadamente 5,000 años (entre la erupción del domo de precaldera la Mesa El León y la Toba Tala) el sistema se enriqueció por una capa rica en volátiles y en cationes multivalentes. Como la concentración de éstos no ocurrió siguiendo la erupción de los domos de anillo más antiguos; sino por el contrario, en las lavas posteriores, la mayoría de los elementos traza decrece en concentración.

### IV.3. Datos analíticos para las rocas que afloran en el Campo Geotérmico de La Primavera, Jal.

El análisis de la interacción fluido-roca se realizará utilizando las muestras no alteradas (tabla 3) estudiadas por Mahood (1981b); además de 21 muestras de recortes y núcleos de pozos perforados por CFE analizadas en este trabajo, completando este análisis con 12 muestras superficiales, 6 de ellas muy alteradas asociadas a emanaciones de fumarolas y una de ellas tomada junto a uno de los manantiales calientes. Las últimas 5 muestras que completan las muestras superficiales fueron tomadas de afloramientos que presentaban poca alteración y no estaban asociadas a ninguna manifestación hidrotermal (figura 5).

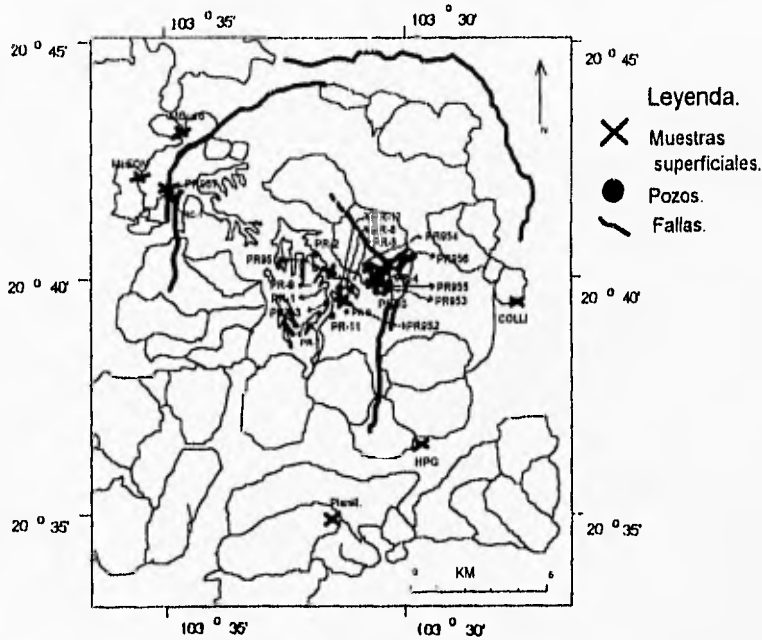


Figura 5. Localización de muestras analizadas en este trabajo.

#### Preparación de muestras.

Para elementos mayores la preparación consistió en la fusión de 0.8 g de muestra problema y 7.2 g de fundente, constituido por  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  y  $\text{LiBO}_2$  granular. Para el análisis de



elementos traza se elaboraron tabletas prensadas con 4 g de muestra y 1.5 g de aglutinante. El análisis de las muestras se realizó en el espectrómetro de fluorescencia de rayos X del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica, (Instituto de Geología, U.N.A.M.). La preparación de las muestras fluididas y prensadas se realizó en sistemas computarizados de Corporation Scientifique Claisse (Lozato-Santa Cruz et al; 1995).

*Composición química de rocas alteradas que afloran en La Primavera.*

Los resultados se obtuvieron comparando los análisis realizados en roca fresca (Tabla 4), con los análisis presentados a continuación (Tabla 5).

	PR951	PR952	PR953	PR954	PR955	PR956	PR957	PR342
	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO <sub>2</sub>	50.20	44.99	75.25	84.40	17.06	72.67	76.61	75.58
TiO <sub>2</sub>	0.40	0.36	0.15	0.16	0.25	0.16	0.09	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.91	36.61	11.49	6.76	35.99	14.09	11.82	11.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.45	5.09	2.55	1.25	4.10	2.76	2.29	2.99
MnO	0.04	0.02	0.04	0.01	0.00	0.03	0.04	0.04
MgO	0.20	0.08	0.15	0.08	0.13	0.09	0.07	0.07
CaO	0.10	0.12	0.28	0.17	0.00	0.31	0.30	0.35
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.25	1.12	0.00	0.00	0.00	4.47	4.20
K <sub>2</sub> O	0.85	0.04	4.23	1.40	1.57	3.57	4.61	4.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.60	0.02	0.00	0.04	0.02	0.02	0.02
P <sub>2</sub> C	13.36	13.70	6.92	6.74	20.61	6.78	0.00	1.26
Suma	99.71	101.27	101.29	100.97	99.75	100.48	100.12	100.02
Trazas (ppm)								
Rb	nd	2	167	43	2	133	175	159
Sr	nd	4	15	nd	9	2	0	1
Ba	234	218	277	223	266	219	206	218
Cr	113	nd	nd	16	nd	8	15	35
Co	23	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ni	60	11	13	17	12	14	16	19
Cu	30	12	12	16	11	13	15	21
Zn	67	349	141	58	23	140	137	128
	PR1192	PR1400	PR5200	CP/ANILL	MURRO	MLFON	CCOLLI	HPc
	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO <sub>2</sub>	76.49	78.91	77.34	77.85	76.24	75.89	76.94	76.44
TiO <sub>2</sub>	0.11	0.10	0.13	0.07	0.17	0.11	0.07	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.95	12.15	12.05	11.99	11.89	12.41	12.05	11.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.84	1.80	1.13	1.75	2.28	1.94	1.26	1.86
MnO	0.03	0.01	0.00	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04
MgO	0.06	0.09	0.02	0.09	0.00	0.01	0.01	0.02
CaO	0.18	0.14	0.14	0.26	0.30	0.28	0.37	0.30
Na <sub>2</sub> O	4.24	3.75	4.01	4.32	4.26	4.06	4.32	4.23
K <sub>2</sub> O	4.68	4.08	4.60	4.40	4.67	4.45	4.30	4.47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02
PH			0.15	0.10	0.19	0.17	0.04	0.02
P <sub>2</sub> C	0.57	0.61	0.46	0.04	0.57	1.14	0.39	1.87
Suma	100.16	101.64	100.04	100.92	100.64	100.53	99.80	100.95
Trazas (ppm)								
Rb	184	219	171	159	134	158	134	149
Sr	1	3	1	1	1	1	1	1
Ba	223	218	212	227	178	222	216	205
Cr	57	31	nd	nd	1	3	nd	1
Co	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ni	23	19	13	13	13	13	13	13
Cu	22	17	12	12	12	13	12	12
Zn	125	111	86	98	107	113	78	119

Tabla 5. Análisis de fluorescencia de rayos X para muestras alteradas y poco alteradas superficiales y poco profundas.

Explicación de claves de la tabla 5

**Rocas poco profundas**

PR442	Recortes de Riolitas superiores del pozo PR-4 a 42 m de profundidad
PR1192	Recortes de Toba Tala del pozo PR-1 a 192 m de profundidad.
PR5200	Recortes de Toba Tala del pozo PR-5 a 200 m de profundidad.
PR1400	Recortes de Riolitas inferiores del pozo PR-1 a 400 m de profundidad

**Rocas superficiales**

MLEON	Muestra de la Mesa El León.
MBURRO	Muestra de la Mesa El Burro.
CPLANILL	Muestra del Cerro Planillas
CCOLLI	Muestra del Cerro El Colli.
HIPG	Muestra del horizonte de pómez gigante

**Descripción de las muestras alteradas y explicación de claves**

PR951	Roca alterada parte de la Toba Tala.
PR952	Roca muy alterada, principalmente formada de caolín. Toba Tala.
PR953	Roca pumicitica alterada perteneciente a la Toba Tala.
PR954	Riolita muy alterada con gran cantidad de arcillas y óxidos.
PR955	Riolita muy alterada, se observan rasgos de azufre, caolín y algunos óxidos.
PR956	Riolita alterada con coloraciones rojizas, tal vez debidas a óxidos.
PR957	Toba Tala con fragmentos pumiciticos muy alterados y otros fragmentos de roca.

Las características químicas de las rocas alteradas no presentan grandes similitudes entre sí, pero podemos ordenarlas en dos categorías o grupos:

El primer grupo se refiere a las rocas que presentan ligera alteración (muestras PR953, PR956 y PR957). El segundo grupo comprende las rocas que presentan una alteración extrema, las cuales a su vez se pueden dividir en dos subgrupos (Ver Tabla 4):

Dentro del primer grupo se tiene a las muestras PR953, PR956 y PR957, en las cuales solo es posible observar un aumento en el contenido de hierro (> 2.2%). Además, se tiene a la muestra PR956 que presenta una ligera disminución de sílice y un aumento en alúmina.

Dentro del primer subgrupo del segundo grupo (muestras PR951, PR952 y PR955), las muestras presentan en sus composiciones químicas una disminución en el contenido de sílice (menores a 50% en promedio) y un aumento en el contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (mayor al 30% en promedio) y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (> a 5%), además de la disminución de K<sub>2</sub>O (< 1.6%) y la casi completa desaparición de Na<sub>2</sub>O (< 0.2%) (Ver Tabla 4).

En el segundo subgrupo del segundo grupo las rocas alteradas (muestra PR954), presentan un aumento considerable en sílice (mayores al 80%), una disminución en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (< 7%) y una disminución de igual proporción en K<sub>2</sub>O y Na<sub>2</sub>O.

Además, tenemos que las rocas de recortes poco profundas y las muestras superficiales, muestran concentraciones muy parecidas con las de las rocas poco alteradas, con un ligero aumento en la concentración de Fe total.

#### **IV.4. Composición química de las rocas en el subsuelo en La Primavera, Jal.**

De los pozos perforados en La Primavera, se tienen las siguientes litologías en el subsuelo: Una intercalación de tobas líticas y andesitas, un horizonte de riolitas y andesitas, y un basamento granodiorítico a granítico (ver tabla 2) Estas rocas como minerales de alteración característicos presentan calcita, epidota, cuarzo secundario y clorita (ver Apéndice). Obteniendo los siguientes resultados al analizar la tabla 6:

	PR9605	PR12640	PR1644	PR7860	PR1910	PR11750	PR111717A	PR111720S	PR11583
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO2	72.74	71.01	59.40	70.48	68.08	73.24	49.22	52.30	46.94
TiO2	0.13	0.46	1.59	0.28	0.53	0.13	1.60	0.78	1.84
Al2O3	12.49	13.99	16.40	14.82	15.35	12.41	14.55	16.60	15.87
Fe2O3t	1.70	3.56	7.67	2.04	3.91	1.70	9.51	8.37	11.67
MnO	0.05	0.05	0.16	0.07	0.07	0.07	0.14	0.18	0.14
MgO	0.06	0.48	0.92	0.29	0.59	0.08	5.17	7.84	4.07
CaO	0.52	1.55	4.19	2.08	1.60	2.01	10.23	6.90	9.29
Na2O	3.46	3.37	4.84	3.71	3.09	4.00	2.93	2.49	3.10
K2O	4.51	3.44	2.11	4.76	5.44	4.48	0.73	2.08	0.56
P2O5	0.04	0.10	1.23	0.06	0.11	0.02	0.34	0.16	0.41
PxH	1.24			0.13	0.07	0.13	0.07	0.16	
PxC	3.83	2.06	1.97	1.50	1.51	2.20	5.39	2.92	5.08
Suma	100.76	100.08	100.47	100.23	100.34	100.49	99.89	100.78	99.26
Trazas (ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Rb	203	207	63	111	101	172	7	46	12
Sr	14	178	476	196	192	23	701	441	596
Ba	245	439	933	670	1000	265	521	796	503
Cr	10	44	38	5	nd	4	179	302	125
Co	nd	3	8	3	2	nd	36	38	32
Ni	15	22	17	14	12	14	77	158	52
Cu	14	20	15	13	12	13	35	53	32
Zn	146	132	108	39	133	145	90	101	84
	PR11920	PR171880	PR21900	PR92055	PR112090	PR122303	PR92810	PR92985	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
SiO2	62.37	74.44	68.98	77.73	52.45	49.88	65.07	62.15	
TiO2	0.51	0.23	0.47	0.18	1.46	0.80	0.68	0.88	
Al2O3	17.80	11.80	11.97	11.66	16.87	16.84	15.39	15.06	
Fe2O3t	5.26	3.26	4.84	1.92	9.50	8.37	4.47	5.09	
MnO	0.08	0.06	0.09	0.08	0.15	0.27	0.15	0.13	
MgO	1.53	0.41	1.37	0.18	5.60	8.07	1.85	1.99	
CaO	5.17	1.92	3.69	0.26	8.34	5.92	3.78	5.17	
Na2O	4.52	3.35	1.57	3.43	3.46	2.46	3.35	3.06	
K2O	1.49	4.47	2.61	5.09	0.69	3.26	4.66	4.84	
P2O5	0.27	0.04	0.09	0.03	0.47	0.17	0.15	0.20	
PxH				0.00		0.00	0.00	0.00	
PxC	2.03	1.19	4.77	0.23	1.69	4.48	1.08	1.65	
Suma	101.03	100.17	100.46	100.79	100.67	100.52	100.62	100.21	
Trazas (ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
Rb	32	116	100	150	14	82	154	137	
Sr	1176	79	306	12	727	361	259	194	
Ba	1011	296	762	249	588	1134	1053	918	
Cr	30	120	34	17	nd	301	82	41	
Co	13	2	9	nd	nd	38	10	12	
Ni	19	37	21	17	12	156	31	23	
Cu	19	30	24	15	19	51	26	20	
Zn	73	66	45	51	255	133	89	171	

Tabla 6. Análisis de fluorescencia de rayos X para rocas del subsuelo.

Explicación de claves de la tabla 6.

- PR9605 Toba lítica del pozo PR-0 a 605 m de profundidad.
- PR12640 Toba lítica del pozo PR-12 a 640 m de profundidad.
- PR1644 Andesita del pozo PR-1 a 644 m de profundidad.
- PR11750 Andesita del pozo PR-11 a 750 m de profundidad.
- PR7860 Toba lítica del pozo PR-7 a 860 m de profundidad.

PR1910	Toba lítica del pozo PR-1 a 910 m de profundidad.
PR11583	Andesita del pozo PR-1 a 1583 m de profundidad.
PR111717A	Andesita con oquedades rellenas de calcita del pozo PR-11 a 1717 m de profundidad.
PR111720S	Andesita del pozo PR-11 a 1720 m de profundidad.
PR111820	Riolita del pozo PR-11 a 1820 m de profundidad.
PR121880	Riolita del pozo PR-12 a 1880 m de profundidad.
PR21900	Riolita del pozo PR-2 a 1900 m de profundidad.
PR92055	Riolita del pozo PR-9 a 2055 m de profundidad.
PR112090	Andesita del pozo PR-11 a 2090 m de profundidad.
PR122303	Andesita del pozo PR-12 a 2303 m de profundidad.
PR92830	Granodiorita del pozo PR-9 a 2830 m de profundidad.
PR92985	Granito del pozo PR-9 a 2985 m de profundidad.

En las tobas líticas se observa una disminución en el contenido de SiO<sub>2</sub> y un aumento en el contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO, respecto a las riolitas frescas aflorantes en la región.

Las andesitas presentan contenidos de sílice promedios del 50% (con excepción de la muestra PR11750 con un contenido mayor del 70%, la cual debe tener mucha contaminación de una roca ácida), así como contenidos de alúmina mayores del 15% (con excepción de la muestra anterior con contenidos menores al 13%) y de fierro total de 9.5% (la muestra anómala muestra una concentración del 1.7%) en promedio. Con el aumento de la profundidad se tiene un aumento en MgO y CaO, (esto corroborado con la presencia de minerales de alteración como calcita, dolomita, epidota y clorita en estas rocas); y una disminución de K<sub>2</sub>O (Ver Tabla 6).

En las riolitas se observa una disminución en el contenido de sílice (las muestras analizadas presentan contenidos menores del 75%, en contraste con los contenidos mayores en las riolitas aflorantes frescas), un aumento de fierro total (4.2% en promedio), valores mayores de CaO (3% en promedio) y de MgO (1.2% en promedio), con respecto a las riolitas aflorantes frescas en La Primavera.

Por último, las rocas que forman el basamento tienen unas concentraciones promedio de 64% de SiO<sub>2</sub>, alúmina con 15% y de CaO con 4%.

De lo anterior, se infiere que las rocas a profundidad son severamente afectadas por los fluidos hidrotermales.

## **V. Modelos de la interacción agua-roca.**

### **V.1. Generalidades.**

El origen de las aguas y de los químicos disueltos en los sistemas hidrotermales, ha sido objeto de discusión en muchos artículos durante los pasados 100 años (Ellis y Mahon, 1964). Estas investigaciones han logrado importantes resultados sobre muchos puntos de interés, particularmente el referente al predominio del agua meteórica local en sistemas hidrotermales volcánicos con base en datos isotópicos. Muchos investigadores han demostrado que en general las aguas termales volcánicas tienen composiciones isotópicas similares a la de las aguas superficiales locales, pero la posibilidad de que un 5 a 10 % de otro tipo de agua estuviera presente no se ha descartado. Puntos principales de controversia son los referentes a la cantidad de agua de origen magmático presente en estos sistemas y si el material disuelto en las aguas termales es derivado de una fuente magmática o bien proviene de la roca encajonante (Ellis y Mahon, op cit.).

Las opiniones acerca del origen de los químicos presentes en los sistemas hidrotermales de alta temperatura han alternado entre la derivación a partir de un fluido magmático y de la roca encajonante. Elementos como el boro, flúor, litio, potasio, rubidio y cesio, están presentes en altas concentraciones en aguas termales volcánicas y se encuentran en concentraciones altas también en el fluido residual de una mezcla de roca cristalizada; por esta razón, la teoría de origen magmático ha sido apoyada por la mayoría de los investigadores. Poco se sabe acerca de la concentración de muchos de los elementos traza en las rocas volcánicas en zonas geotérmicas, así que el punto de vista alterna de derivación de estas componentes por la interacción del agua caliente con la roca encajonante ha sido descuidado casi por completo. Se ha demostrado que la concentración de los principales constituyentes de las rocas como sodio, potasio, calcio, y sílice en aguas termales está influenciada por las interacciones agua-roca. Sin embargo, los elementos que se encuentran en mejores concentraciones en las rocas ígneas como: cloro, flúor, boro y nitrógeno han sido relacionados a un fluido magmático profundo sin primero examinar cuidadosamente si podrían ser derivados de la interacción agua-roca en niveles poco profundos (Ellis y Mahon, 1964).

En general, el estudio petrológico de minerales hidrotermales presentes en núcleos y muestras de canal nos pueden dar información acerca de la composición de los fluidos hidrotermales. Una conclusión importante acerca del efecto de la composición del fluido sobre la alteración hidrotermal es que la concentración absoluta de los constituyentes disueltos es mucho menos importante que las razones de las actividades de los iones principales (Browne, 1984) los cuales ocasionan la formación de las paragénesis hidrotermales características.

### **V.2. Geoquímica de manantiales.**

#### **V.2.1. Análisis químicos del agua de las manifestaciones superficiales de La Primavera y de los pozos de explotación.**

A la fecha en el campo geotérmico de La Primavera se han perforado 11 pozos de explotación y uno inyector, quedando uno más suspendido a la mitad de la profundidad total programada (Gutiérrez Negrín, 1991). Los pozos perforados tienen profundidades variables: desde 442 m para el pozo inyector hasta 2896 m para el pozo más profundo. Su profundidad promedio es de 1926 m (ver figura 6).

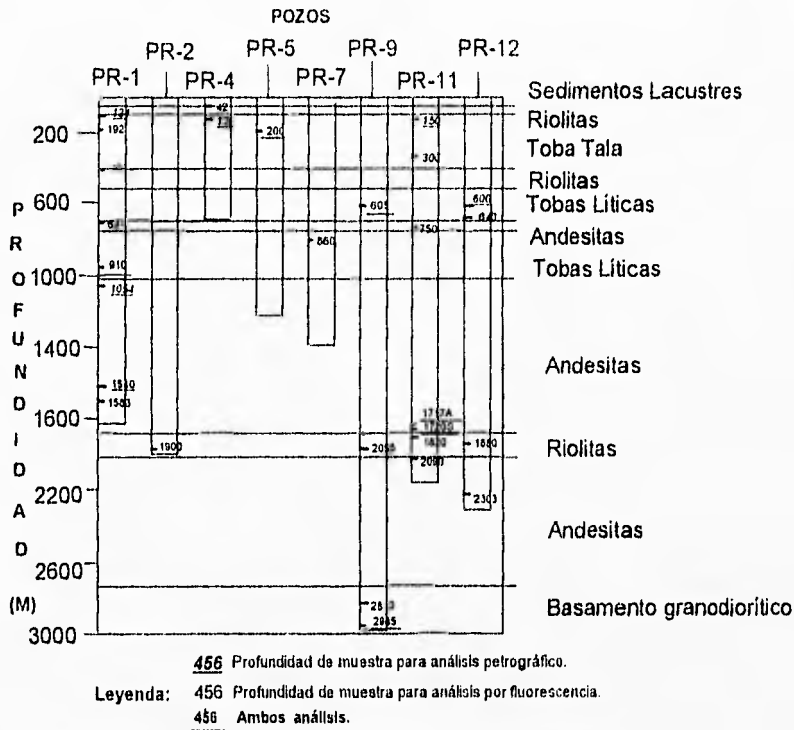


Figura 6. Representación esquemática con las profundidades de los pozos perforados por CFE en el Campo Geotérmico de La Primavera y localización de las muestras analizadas en este trabajo.

De los estudios realizados en los pozos de explotación, tenemos que los fluidos geotérmicos del sistema se transportan a través de las andesitas, tobas y riolitas; en sus fracturas y microfracturas de origen secundario, éstas rocas constituyen la cuarta unidad litológica propuesta por Gutiérrez Negrín, 1991 (ver figura 7). Sobreyaciendo a esta unidad, tenemos la tercera unidad geohidrológica constituida por riolitas que parece forman una serie de coladas de lava y domos muy cercanos entre sí, siendo su característica principal que presentan una permeabilidad bastante menor a la de la unidad subyacente, lo que impide el escape de fluidos geotérmicos hacia la superficie y la hace actuar al menos parcialmente, como una capa sello (Gutiérrez Negrín, 1991).

Continuando al final de la columna estratigráfica del área (figura 7), se reconoce un basamento intrusivo el cual posee una permeabilidad muy reducida, por lo que se supone que únicamente permite el paso de cantidades limitadas de flujos magmáticos profundos (principalmente gases), al mismo tiempo que transmite el calor generado por el magma el cual es transmitido por mecanismos conductivos y de convección forzada (Leal Hernández, 1988).

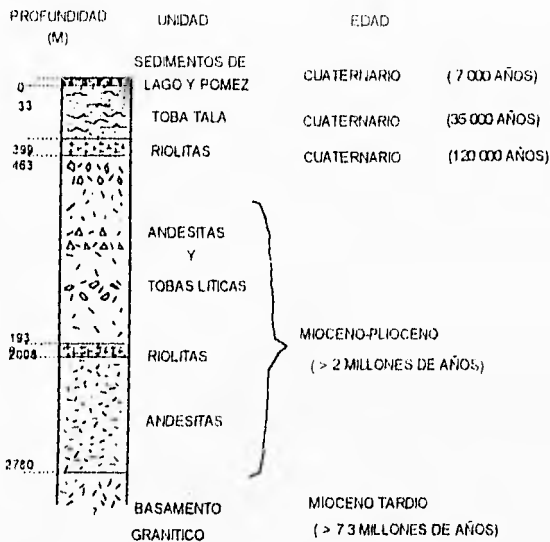


Figura 7. Columna estratigráfica esquemática de La Primavera, Jalisco.

En la caldera La Primavera se han detectado dos acuíferos (ver figura 8): uno somero y uno profundo (Cerriteño Rodríguez, 1991). El primero es un acuífero termal de tipo libre constituido por la Toba Tala (Santoyo-Gutiérrez et al, 1989) que posee una enorme permeabilidad y en el fondo está limitado por las riolitas, que fungen como un acuífugo y permiten el ascenso de fluidos geotérmicos de origen más profundo a través de los planos de falla y fracturas. Las aguas de este acuífero tienen contenido salino del orden de 1100 ppm, con concentraciones de boro de 13 ppm y de arsénico de 4.8 ppm en promedio (Gutiérrez Negrín, 1991).

El acuífero profundo que ha sido identificado como el yacimiento geotérmico se definió a partir de estudios geofísicos (Campos-Enríquez et al, 1987; Rosas, 1988; Santoyo-Gutiérrez et al, 1991; Urrutia Fucuguachi et al, 1988; y Yokoyama y Mena, 1991) y geoquímicos, sus aguas son también de origen meteórico de infiltración relativamente reciente. Al llegar el agua meteórica a la zona con altas temperaturas, se mezcla con los fluidos magmáticos aportados a través del basamento intrusivo (Cerriteño Rodríguez, 1991), se calienta y conforma así el yacimiento geotérmico. El agua del yacimiento tiene contenido de 3500 ppm de sólidos totales disueltos, con niveles de boro superiores a 100 ppm y de arsénico de 15 ppm. El acuífero termal profundo está constituido por la secuencia de rocas de la cuarta unidad litológica mencionada anteriormente. Este acuífero profundo está separado del somero por la tercera unidad litológica y tomando en cuenta la pobre permeabilidad de estas rocas, el acuífero profundo constituye lo que se conoce como un acuífero confinado (Gutiérrez Negrín, 1991).

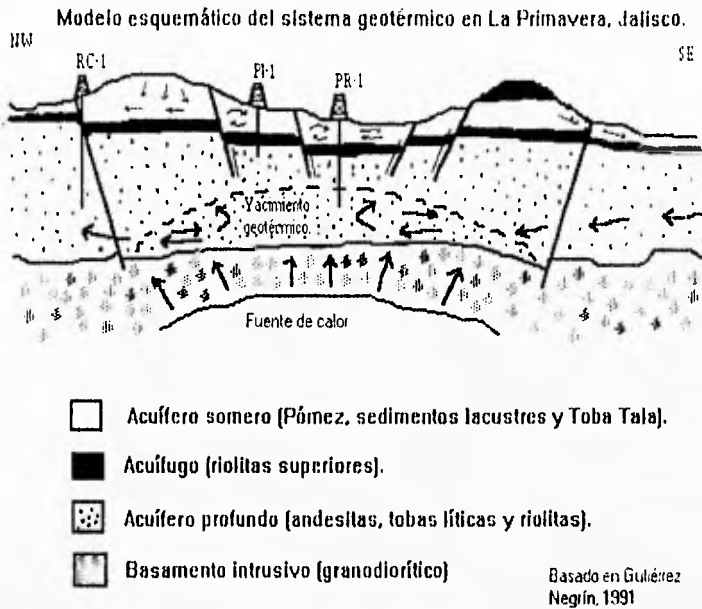


Figura 8. Modelo esquemático del sistema geotérmico en La Primavera, Jalisco.

Los trabajos de exploración del campo geotérmico de La Primavera para la producción de electricidad incluyen análisis químicos e isotópicos del agua de los manantiales, fumarolas y pozos para entender las condiciones del yacimiento y los procesos hidrológicos que tienen lugar en los acuíferos somero y profundo (ver tablas 7 y 8). Las muestras de agua han sido colectadas de los principales manantiales calientes del campo y de un pozo frío en Guadalajara. Y fueron analizadas para elementos mayores disueltos y algunos elementos traza, algunas de gran importancia para el medio ambiente como el arsénico. Análisis de CFE de fluidos de pozos profundos fueron además recopilados. Las muestras de gas fueron colectadas de las fumarolas con más actividad en La Azufre y de pequeñas fumarolas en Las Barrancas (Mahood et al, 1983).

LOCALIDAD	T°C	pH	Li	K	Na	Ca	Mg	Rb	Cs	Mn	SO <sub>4</sub>	Cl	F	HCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	B
ORFANATO	58	7.2	0.88	11	267	5.4	0.81	0.05	0.04	0.15	43	112	18	452	218	12
RIO CALIENTE	67	7	0.92	11	280	3.5	0.4	0.09	0.08	0.05	43	106	17	487	227	9.7
AGUA BRAVA	67	7	0.9	12.5	268	3.8	0.46	0.08	0.06	0.07	31	94	16	495	207	10
ARROYO VERDE	68	6.9	0.87	11	268	4.1	0.46	0.08	0.06	0.08	30	94	17	487	215	9.1
AGUA CALIENTE	63	7.6	1.05	9.5	275	1.5	0.35	0.03	0.04	0.01	5	155	29	177	177	9.1
C. DE LAS FLORES	35	6.8	0.04	2.8	35	2.1	0.86	0.01	0.01	0.01	6	5.4	1.8	90	123	0.2
V. TRAILER PARK	15	n.d.	0.05	5	31	1	0.85	0.11	0.01	0.01	3	1.6	1.6	81	12.2	0.15

Tabla 7. Análisis químicos de manantiales calientes en La Primavera (Mahood et al, 1983).



Los datos isotópicos de manantiales indican composiciones isotópicas similares de hidrógeno para muestras profundas y superficiales; la semejanza de las composiciones de deuterio de los manantiales calientes con el agua del pozo frío, indican que el agua caliente es de origen meteórico; la condensación de las fumarolas parece estar en equilibrio a 170°C con agua del yacimiento. Los valores bajos de Tritio ( $\leq 0.4$  Unidades de Tritio) para el agua indican un tiempo de residencia de alrededor de 50 años (Mahood et al, 1983).

Las características químicas e isotópicas de agua y vapor, así como las temperaturas obtenidas con los geotermómetros químicos e isotópicos pueden ser interpretadas como resultado de un enfriamiento conductivo del agua del depósito durante su flujo a los manantiales (Maltoud et al, 1983).

Pozo	pH	Cl	Na	K	Li	Ca	Mg	Rb	Cs	As	Cl	H	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	SDI
PR-1	8.2	3900	739	170	8.1	1.2	0.01	1.3	1	18	1100	150	11	40	1280	1614
PR-8	8.6	4100	810	130	8	1.4	0.02	1	1	12	870	100	420	110	1040	1783
PR-9	8.3	3400	650	145	6	1.8	0.01	0.5	0.6	15	1030	130	200	54	1200	3273
PR-12	7.9	4430	810	214	9.3	3.2	0.06	1.7	1.1	20	1300	155	61	22	1320	4065
PR-13	8.5	3380	778	128	6.7	1	0.02	1.1	1.2	46	865	103	229	92	1056	3277

Tabla 8 Análisis químicos de aguas descargadas por la exploración de pozos en La Primavera (Mahood et al, 1983; y Gutiérrez Negrín, 1991).

Las aguas descargadas por los pozos de exploración son clasificadas como cloruradas-sódicas; mientras que las aguas de los manantiales calientes en la superficie son una mezcla de aguas cloruradas-sódicas y bicarbonatadas ricas en calcio y magnesio (según Tello Hinojosa et al, 1991; el agua de los manantiales de Río Caliente se clasifica como bicarbonatada sódica; la cual es formada al interaccionar agua de reciente infiltración con roca de origen volcánico a temperaturas relativamente bajas). Las razones de Cl/B en los manantiales presentes sugieren que estos elementos se originaron en la profundidad del sistema. La muestra de agua del pozo frío (Yuca Trailer Park) y la muestra del pozo termal de poca profundidad (Cañón de las Flores) son más diluidas que las aguas de los manantiales pero tienen patrones químicos similares. La semejanza de la química de estas aguas (Cañón de las Flores y Yuca Trailer Park), tanto frías como calientes, indica que adquirieron sus sales disueltas por procesos similares, las variaciones (altas concentraciones de Mg y Ca y bajas de Li y B reflejan temperaturas más bajas de interacción agua-roca) resultan de las diferentes temperaturas de equilibrio (Mahood et al, 1983). El estudio realizado por Tello Hinojosa et al. (1991); determinó que los manantiales de Río Caliente se comportan como una mezcla entre agua meteórica y agua geotérmica con una relación de 8:2; de ahí que presenten altas concentraciones de boro y arsénico. En sus estudios isotópicos este autor corroboró este modelo de mezcla.

Los resultados de la aplicación del programa WATEQ (programa de computo para analizar las concentraciones de los cationes principales en los fluidos para obtener los minerales más susceptibles a precipitar en las rocas) a los datos químicos de los manantiales de La Primavera son los siguientes (tabla 9):

Fase/S.	Rio C.	Mon.	A. V.	A. H.	1	4	5	6	7	8	9
Calciclauca	0.639	0.85	0.593	0.55	0.748	0.748	0.719	0.63	0.72	0.74	0.66
Cantabulita	0.623	0.88	0.575	0.54	0.735	0.735	0.707	0.64	0.70	0.73	0.64
Quarzo	0.977	1.27	0.927	0.89	1.022	1.021	1.063	1.00	1.06	1.09	1.00
SiO <sub>2</sub> (a.l.)	0.150	0.35	0.104	0.06	0.258	0.258	0.23	0.16	0.23	0.25	0.17
Talco	2.679	5.10	3.361	7.61		0.246	2.734	3.09			3.87
Calcita		0.11		0.53			0.064	0.22			0.20
SiO <sub>2</sub> (a.M)		0.06									
Argonita				0.41				0.1			0.08

Tabla 9 Resultados obtenidos del programa WATEQ, en el cual observamos las diferentes fases minerales con sus correspondientes índices de saturación, para diferentes muestras de manantiales termales en el Campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.

Explicación de las claves de la tabla 9.

- I. S            Índice de saturación
- Rio C        Río Caliente
- Mon.        Arroyo las Monjas.
- A.V.        Agua verde
- A.B.        Agua Brava.
- 1,4,5,6,7,8,9    Manantiales Río Caliente.

Los minerales susceptibles de precipitar y alterar a la roca en la superficie son principalmente cuarzo y sus variedades: calcedonia, cristobalita y sílice amorfo, de ahí que tengamos una disminución (observada en el primer subgrupo del segundo grupo en las rocas alteradas) y un aumento de sílice (como se observa en el segundo subgrupo del segundo grupo en las rocas alteradas) en nuestros análisis químicos debido a la interacción del agua de los manantiales calientes. Además tenemos susceptible de precipitar a la calcita, aunque la mayor parte de la calcita precipita por una disminución de la temperatura (la cual se observa en la mayoría de nuestras muestras en los análisis petrográficos, ver apéndice). De acuerdo a los datos químicos procesados el talco es susceptible de formarse, aunque este mineral no es observado en el estudio petrográfico realizado.

Los datos de arsénico para pozos y manantiales (figura 9) fueron graficados en un diagrama Eh-pH a 25°C y una atmósfera de presión (Ferguson y Davis, 1972) para identificar cuales serían los compuestos de arsénico más estables en dichas condiciones ya que el programa WATEQ no proporciona los índices de saturación para los minerales de arsénico.

Diagrama esquemático.

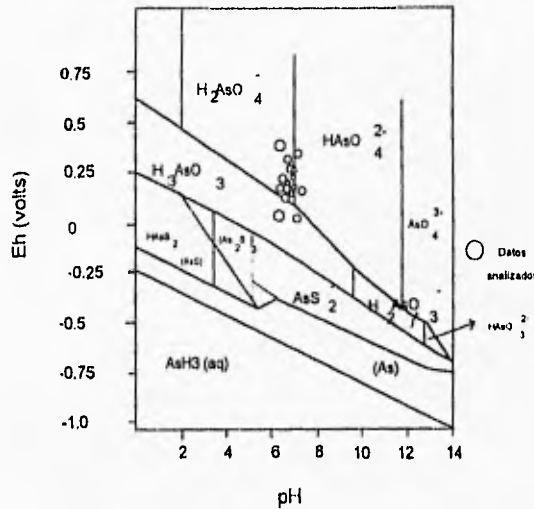


Figura 9. Graficación de datos de arsénico de pozos y manantiales en un diagrama Eh-pH.

De los datos graficados, se observa que el arsénico se encuentra en su totalidad en las especies acuosas, de las cuales el mayor número de datos cae en los campos de la especie de ácido arsenico (As-V), mientras que sólo dos muestras se encuentran en el campo del ácido arsenioso (As-III); el cual es de gran toxicidad al ingerirse en grandes cantidades. Esto nos indica que en el acuífero somero no es de esperar que se encuentren minerales de arsénico ya que sus compuestos más estables son las especies solubles.

### V.3. Comparación de las características químicas de las rocas frescas y rocas alteradas.

El estudio consistió en la normalización, en primera instancia de las muestras no alteradas estudiadas por Mahood para compararlas con las muestras superficiales recolectadas para este estudio. Figura 10 y Tabla 10.

U.R.A.	Desvesa	Elmanto	PR951	PR952	PR953	PR954	PR955	PR956	PR957	MLEON	MBarro	HPG	Planilla	COLLI
75.41	0.90	SiO2	0.67	0.60	1.00	1.12	0.49	0.96	1.02	1.01	1.01	1.01	1.03	1.02
6.12	0.04	TiO2	3.31	3.01	1.22	1.30	2.06	1.37	0.78	0.95	1.42	0.97	0.61	0.60
11.52	0.18	Al2O3	2.51	3.18	1.00	0.59	3.12	1.22	1.03	1.08	1.01	1.00	1.04	1.05
1.71	0.24	Fe2O3	3.18	2.98	1.49	0.73	2.4	1.61	1.34	1.13	1.31	1.09	1.02	0.71
0.05	0.01	MnO	0.85	0.47	0.71	0.26	0.08	0.69	0.81	0.69	1.03	0.89	0.85	0.79
0.04	0.00	MgO	4.82	1.86	3.62	1.28	3.23	2.20	1.81	0.34	0.07	0.49	2.20	0.27
0.24	0.03	CaO	0.41	0.52	1.20	0.72	0.03	1.30	1.28	1.17	1.28	1.26	1.12	1.57
4.43	0.23	Na2O	0.05	0.06	0.28	0.00	0.00	0.00	1.01	0.92	0.96	0.95	0.97	0.97
4.61	0.14	K2O	0.18	0.00	0.92	0.30	0.34	0.77	1.00	0.96	1.01	0.97	0.96	0.93

Tabla 10. Concentración de elementos mayores en muestras superficiales alteradas normalizadas al promedio de rocas no alteradas (U.R.A) de los análisis reportados por Mahood (1981b).

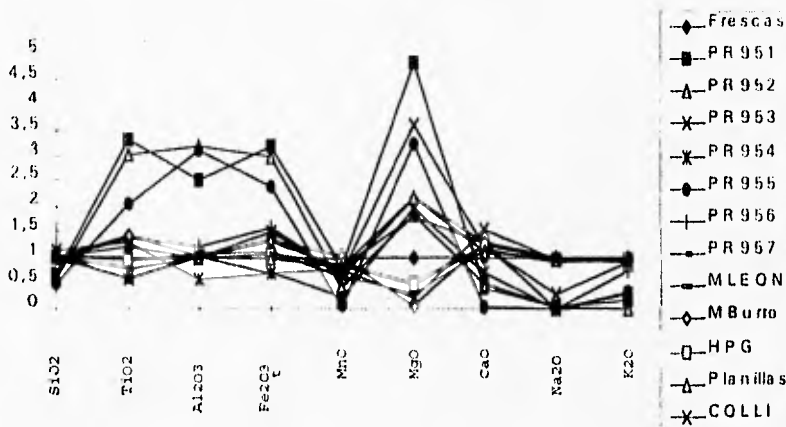


Figura 10. Concentración de elementos mayores en muestras superficiales alteradas normalizadas a una composición promedio de rocas no alteradas de datos de Mahood (1981b).

Los rasgos característicos de las rocas alteradas son el incremento en las concentraciones de hierro, magnesio, titanio y aluminio y la mayoría de estas rocas alteradas presentan una disminución en sílice, calcio, sodio, manganeso y potasio.

Posteriormente se normalizaron las muestras de pozos profundos (de profundidades mayores a 500 m) para compararlas con las muestras superficiales, pero en este caso, para ver las variaciones de los elementos traza. Figura 11 y Tabla 11.

D.W.S.A.	Desvet.	Elementos	PR95	PR95	PR95	PR95	PR95	PR95	PR95	MLEON	MBuro	HPG	Planillas	COLL
			1	2	3	4	5	6	7				1	
100.41	64.92	Rb	0.39	0.02	1.66	0.43	0.02	1.34	1.74	1.57	1.33	1.48	1.58	1.48
109.47	53.89	Zn	2.27	3.19	1.29	0.53	0.21	1.28	1.25	1.03	1.03	1.09	0.90	1.09
669.59	307.62	Ba	0.35	0.33	0.41	0.33	0.40	0.33	0.31	0.33	0.33	0.31	0.34	0.31
24.18	12.56	Cu	0.50	0.50	0.50	0.66	0.45	0.54	0.62	0.54	0.54	0.50	0.50	0.50
78.35	98.04	Cr	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.10	0.19	0.04	0.04	0.04	0.00	0.01
41.00	46.76	Ni	0.29	0.27	0.32	0.41	0.29	0.34	0.39	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
12.12	14.35	Co	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
348.88	111.52	Sr	0.00	0.01	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.003

Tabla 11. Concentración de elementos traza en muestras superficiales alteradas normalizadas a un promedio de muestras de pozos profundos (D.W.S.A.).

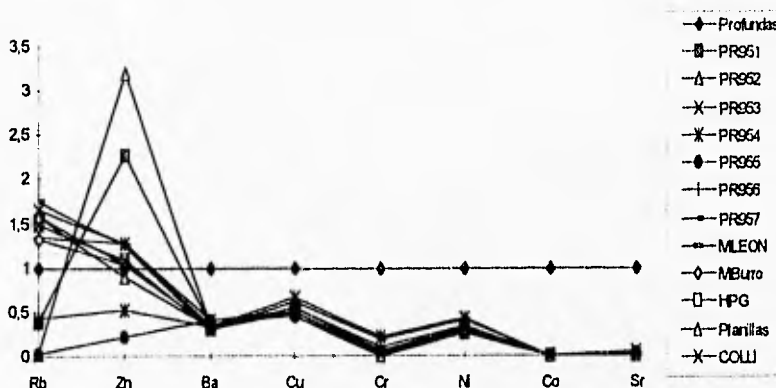


Figura 11. Concentración de elementos traza en muestras superficiales normalizadas a un promedio de muestras de pozos profundos (> 500 m).

Tenemos que las muestras profundas presentan un enriquecimiento en casi todo los elementos traza con excepción del Rb y Zn, en cuanto a éste último elemento tenemos concentraciones anómalas en las muestras PR951 y PR952.

Además, se hizo la normalización de las muestras profundas para compararlas con las muestras poco profundas (muestras con profundidades menores a 500 m, las cuales son muestras

de recortes y núcleos, pero que presentan litologías que se observan en superficie). Figura 12 y Tabla 12.

D.W.S.A.	Desvest.	Elementos	PR442	PR1192	PR5200	PR1400
100,41	64,92	Rb	1,58	1,83	1,70	2,18
109,47	53,89	Zn	1,17	1,14	0,79	1,01
669,59	307,62	Ba	0,33	0,33	0,32	0,33
24,18	12,56	Cu	0,95	0,91	0,50	0,70
78,35	98,04	Cr	0,45	0,73	0,00	0,40
41,00	46,76	Ni	0,46	0,56	0,12	0,46
12,12	14,35	Co	0	0	0	0
148,88	311,52	Sr	0,00286	0,00286	0,00286	0,02579

Tabla 12. Concentración de elementos traza en muestras de pozos poco profundas de muestras alteradas normalizadas a un promedio de muestras de pozos profundos (D.W.S.A.).

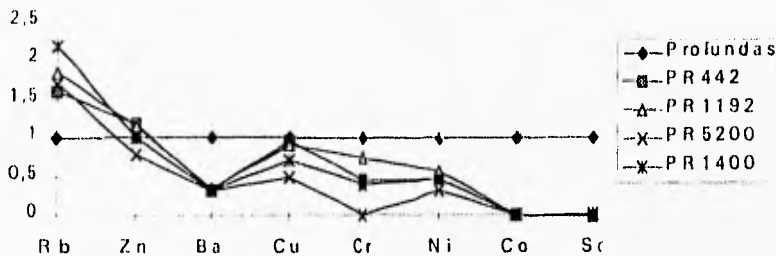


Figura 12. Concentración de elementos traza en muestras poco profundas (< 500 m) normalizadas a un promedio de muestras de pozos profundos (> 500 m).

Aquí observamos, que las muestras profundas presentan un marcado enriquecimiento en Ba, Co y Sr y una disminución en Rb, respecto a las muestras poco profundas.

De los resultados de análisis químicos se observa que las concentraciones de elementos siguen ciertos patrones que demuestran la deposición preferencial de algunos elementos a ciertas profundidades de acuerdo con sus propiedades químicas (solubilidad, fraccionamiento entre la fase líquida y la gaseosa, preferencia a formar compuestos insolubles). Así, podemos observar como el Fe tiende a viajar en el fluido hidrotermal desde las profundidades depositándose en algunos minerales como clorita y epidota y profundidades someras precipitar en la forma de óxidos de Fe en las rocas superficiales alteradas. En cuanto al Mg, éste tiende a ser depositado por el fluido hidrotermal y que las arcillas tienden a absorber este elemento (Wedepohl, 1969), de ahí que observemos un aumento en el contenido de Mg en las rocas alteradas. Por otro lado, el K y Na tienden a viajar en el fluido hidrotermal, para ser precipitados en la superficie, en la estructura de algunas arcillas y micas hidrotermales. El Ti es removido de las rocas profundas de los minerales primarios como augita y biotita principalmente, para posteriormente integrarse en la estructura de alguna esfera secundaria.

En cuanto a lo referente a los elementos traza, tenemos que las muestras más profundas tienden a tener concentraciones más altas de estos elementos. La literatura nos dice que el Rb tiende a estar concentrado en grandes cantidades en el fluido hidrotermal, en el caso de nuestro estudio este elemento tenderá a precipitar en un gran número de rocas en la estructura de algunas arcillas (Wedepohl, 1969). En el caso del zinc, es un problema complejo porque este elemento no se caracteriza por presentarse enriquecido en rocas superficiales. Tal vez por su camino hacia la superficie el fluido hidrotermal disolvió precipitados de Fe ricos en Zn, los cuales en la superficie fueron absorbidos por la montmorillonita y por algunos óxidos de Fe (Wedepohl, 1969).

En el caso del arsénico, este elemento necesita de más estudios para concluir algo determinante en cuanto a su comportamiento, sabemos que este elemento tiende a precipitar en las rocas del subsuelo, pero no observamos en qué especie mineral, probablemente se encuentre en la estructura de alguna arcilla o en la de algún hidróxido de hierro; porque no se ha identificado la presencia de oropimente o realgar en esas rocas, además podemos afirmar que gran parte de ese arsénico no se precipita en los estratos más someros, sino que viaja en el fluido hacia la superficie en la forma de sus especies acuosas, de acuerdo con el diagrama de fases mostrado en la figura 9 (tomado de Ferguson y Davis, 1972).

## VI. Conclusiones.

Con base en los datos recopilados de la literatura y los trabajos de campo y de laboratorio realizados se llegó a las siguientes conclusiones:

Las rocas aflorantes en el Campo Geotérmico de La Primavera presentan como fenocristales más importantes al sanidino y el cuarzo; el resto de los fenocristales comprende a la ferrohedenbergita, fayalita e ilmenita; además se reportaron de los análisis petrográficos la presencia de biotita y hornblenda. Como alteración característica se presenta cuarzo secundario y arcillas.

Las rocas del subsuelo comprenden una intercalación de andesitas tobas líticas, riolitas y un basamento granodiorítico. Las andesitas presentan como mineralogía característica una matriz de labradorita-andesina con algunos fenocristales de augita y olivino. La alteración principal está formada por epidota, calcita y arcillas.

Las tobas líticas presentan características de los líticos que la forman (ya sean de tipo ácido o intermedio o ambos). Su alteración consiste de calcita, epidota y arcillas.

El basamento granodiorítico comprende una matriz intergranular de cuarzo y feldespato, con algunos fenocristales de biotita. La alteración presente se forma por calcita, epidota y clorita.

Todas las rocas aflorantes no alteradas en La Primavera presentan composiciones químicas similares para elementos mayores.

El arsénico no se encuentra presente en las rocas aflorantes o es menor a 9 ppm, presentándose en las rocas en el subsuelo en concentraciones que varían de 1 a 60 ppm.

Del estudio realizado con el programa WATEQ, el cuarzo principalmente y en menor proporción la calcita, son susceptibles a precipitar.

En cuanto a la normalización hecha en las rocas profundas comparadas con las rocas superficiales y poco profundas en cuanto a elementos trazas tenemos los siguientes resultados:

Las muestras profundas presentan un enriquecimiento en casi todo los elementos traza (Ba, Cu, Cr, Ni, Co, Sr), siendo este muy marcado en Ba, Co y Sr como se ve al hacer la comparación con las muestras poco profundas; siendo la excepción el Rb y Zn, en cuanto a éste último elemento tenemos concentraciones anómalas en las muestras PR951 y PR952 tomadas en la superficie.

De los resultados de análisis químicos se observa que las variaciones en las concentraciones siguen ciertos patrones que demuestran la deposición preferencial de algunos elementos a ciertas profundidades de acuerdo con sus propiedades químicas (solubilidad, fraccionamiento entre la fase líquida y la gaseosa, preferencia a formar compuestos insolubles). Así, tenemos que los elementos mayores se comportan de la siguiente forma:

Se observa un enriquecimiento de Fe, Mg y Ti en las muestras superficiales alteradas, así que estos elementos tienden a viajar del fluido hidrotermal profundo para precipitarse posteriormente en la superficie, además de que identificamos minerales de alteración formados a profundidad a partir de estos elementos de las interacciones fluido-roca como calcita, clorita y epidota principalmente. Mientras que en Si, Ca, K, Na y Mn están empobrecidas, por lo que se

observa cierta afinidad de éstos elementos para viajar en el fluido hidrotermal, aunque de las interacciones fluido-roca, algunos de estos elementos tienden a precipitar en la estructura de alguna arcilla, además de que el Si tiende a formar cuarzo secundario.

Por lo que se refiere al arsénico, éste se encuentra enriquecido en las muestras profundas y en los estratos más superficiales debe encontrarse en sus formas solubles de acuerdo a las condiciones de Eh-pH.



## Bibliografía.

- Alatorre-Zamora, M. A. y Campos-Enriquez, J. O. 1992. La Primavera Caldera (México): Structure inferred from gravity and hydrological considerations. *Geofísica Internacional*. Vol. 31. No. 4. pp 371-382.
- Browne, P. 1984. Lectures on Geothermal Geology and Petrology. UNU. Geothermal Training Programme, Iceland. 92 pp.
- Campos-Enriquez, J. O., Venegas-Salgado, S., Sánchez-Reyes, S., Negrete, A., Morán-Zenteno, D., Delgado, H., Urrutia-Fucugauchi, J. 1987. Paleomagnetic study of the Sierra La Primavera: Preliminary results. Geothermal Resources Council. TRANSACTIONS, Vol. 11. pp. 323-326.
- Cerriteño Rodríguez, O. 1991. Características hidrodinámicas del acuífero somero de La Primavera. CFE. Reporte interno 12/91. 20 pp.
- Demant, A. y Vincent, P. 1978. A preliminary report on the comenditic dome and ash flows complex of Sierra La Primavera, Jalisco: Discussion. *Revista del Instituto de Geología. U.N.A.M.* Vol. 2, pp. 218-222.
- Ellis, A. J. y Mahon, W. A. J. 1964. Natural hydrothermal systems and experimental hot-water/rock interactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 28. pp 1323-1357.
- Ellis, A. J. y Mahon, W. A. J. 1977. *Chemistry and Geothermal Systems*. Academic Press. New York. 392 pp
- Ferguson, J. y Davis, J. 1972. A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Research Pergamon Press*. Vol. 6, Great Britain. pp 1259-1274.
- Giggenbach, W. F. 1988. Geothermal solute equilibria: Derivation of Na, K, Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta. USA* Vol. 52. pp. 2749-2765.
- Gutiérrez Negrín, L. 1991. Recursos geotérmicos en La Primavera, Jalisco. *Ciencia y Desarrollo*. Vol. XVI, no. 96. pp 57-69.
- Henley, R. 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.
- JICA, 1989. Evaluación del yacimiento geotérmico en La Primavera. 122 pp.
- Leal Hernández, R. 1988. Modelo geológico del Campo Geotérmico La Primavera, Jalisco. CFE. Reporte interno 18/88. 32 pp.

López Hernández, A. 1991. Análisis estructural y aportes al conocimiento volcánico en la Sierra La Primavera, Jal. Tesis Profesional. U.N.A.M. 80 pp.

Lozano Santa Cruz, R. Surendra, P. V., Girón, P., Velasco, F., Marán Zenteno, D., Viera, F. y Chávez, G., 1995. Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas. Actas INAGEQ. Vol. 1, No. 1. pp. 203-208.

Luhr, J. F. y Carmichael, I. S. E. 1981. The Colima volcanic complex, México. Part II. Late-Quaternary cinder cones. Contributions to Mineralogy and Petrology. Vol. 76, pp. 127-147.

Meyer, C. y Henley, J. J. 1967. Wall rock alteration: en Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, H. L. Barnes, de., New York: Holt, Rinehart y Winston, pp. 166-235.

Mahood, G. A. 1977. A preliminary report on the comenditic dome and ash flows complex of Sierra La Primavera, Jalisco. Revista del Instituto de Geología. U:N.A.M. Vol. 1, pp. 177-190.

Mahood, G. 1980. Geological Evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center-Sierra La Primavera, Jalisco, México. Journal of Volcanology and Geothermal Research. No. 8. Elsevier Scientific Publishing Company. Bélgica. pp 199-230.

Mahood, G. A. 1981a. A summary of the Geology and Petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, México. Journal of Geophysical Research, vol. 86, no. B11, pp. 10137-10152.

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

Mahood, G. y Drake, R. 1982. K-Ar dating young rhyolitic rocks: A case study of the Sierra La Primavera, Jalisco, México. Geological Society of America Bulletin, vol. 93. pp. 1232-1241.

Mahood, G., Truesdell, A., Templos and Templos, L.S., 1983. A reconnaissance geochemical study of La Primavera Geothermal Area, Jalisco, México. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 16. The Netherlands. pp 247-261.

Prol Ledesma, R. M. 1988. El calor de la Tierra. Fondo de Cultura Económica. La ciencia desde México. No. 58. 99 pp.

Rosas, J. 1988. Comentarios sobre los resultados geofísicos en el Campo Geotérmico de La Primavera. Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía. Vol. 4. No. 1, pp. 89-96.

Santoyo Gutierrez, S., Barroso, G. A., Pérezyera, J. y Rosas A. 1989. Desarrollo de un sistema de obturantes para combatir pérdidas de circulación en el Campo de La Primavera, Jal. Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía, Vol.5 No. 1, pp. 195-217.

Santoyo-Gutiérrez, S., García, A., Morales, M., Pérezyera, J. y Rosas, A. 1991. Applied technology in the solution of geothermal drilling problems of deep wells in La Primavera caldera (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 47, pp. 195-208.

Silberman, M. L. y Berger, B. R. 1985. Relationship of trace-element patterns to alteration and morphology in epithermal precious-metal deposits; *Geology and Geochemistry of epithermal systems*: Society of Economic Geology. *Reviews in Economic Geology*. Berger and Bethke, Editors. pp. 203-232.

Simmons, S. 1994. *Short course notes: Volcanic-hosted Epithermal Deposits and their Exploration Models*. UNAM. 108 pp.

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

Tello Hinojosa, E.; Villa Merlo, J. y Chacón Franco, M. 1991. Geoquímica del agua de los manantiales de Río Caliente, Jal. CFE. Reporte interno. Informe 1/91. 15 pp.

Urrutia-Fucugauchi, J.; Ramírez Negrete, A.; Venegas Salgado, S.; Sánchez Reyes, S.; Delgado Granados, D.; 1988. Paleomagnetismo y magnetoestratigrafía de la Sierra de La Primavera, Jalisco. *Geofísica Internacional*, Vol. 27; pp. 395-414.

Wedephol, K. H. 1969. *Handbook of Geochemistry*. Springer Verlag, Berlin. pp. A1-17.

White, D. 1955. Thermal springs and epithermal ore deposits: *Economic Geology*. Volumen del 50 Aniversario. pp. 99-154.

Yokoyama, Y. y Mena, M. 1991. Structure of La Primavera caldera, Jalisco, México, deduced from gravity anomalies and drilling results. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 47 pp. 183-193.

## ESTUDIO PETROGRÁFICO A

**No. de registro:** PR-1. P.1054 No.527. **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color gris con textura afanítica, en partes porfírica, al observarse con lupa la muestra presenta algunos fenocristales de plagioclasas. Presenta superficies cubiertas por goethita-hematita.

### II. Descripción microscópica.

Presenta una textura porfídica con una matriz pilotaxítica, está constituida por plagioclasas zonadas, con ferromagnesianos alterados y opacos intersticiales.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Plagioclasas (Andesina, Labradorita)	75	Se encuentra formando una matriz de microlitos, y la zonación en las plagioclasas nos indica su carácter más ácido, correspondiente a la andesina.
Calcita	5	Se encuentra formando parches sobre fenocristales de plagioclasas.
Ferromagnesianos.	13	Sumamente alterados a clorita y opacos.
Apatita.	2	Cristales euhedrales en plagioclasas y en ferromagnesianos alterados.
Cuarzo.	2	Cuarzo secundario microcristalino reemplazando las plagioclasas.
Opacos	3	En formas intersticiales en la matriz.

### IV. Clasificación y observaciones.

Andesita parcialmente alterada afectada por los fluidos hidrotermales.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO B

**No. de registro:** PR-I P.1054 No.527 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Ver estudio petrográfico A

### II. Descripción microscópica.

Presenta una textura glomeroporfídica, constituida en una matriz formada por un mosaico de plagioclasas (microlitos), además de opacos y ferromagnesianos.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Plagioclasas	89	Presenta características similares al estudio A
Opacos	7	Producto de alteración de los ferromagnesianos, ya completamente alterados.
Calcita	2	Forma parches en las plagioclasas.
Epidota	2	Producto de alteración presente como parches.

### IV. Clasificación y observaciones.

Andesita parcialmente alterada. En comparación con el estudio petrográfico A, esta lámina tienen una menor cantidad de opacos, así como de calcita.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.

**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO C

**No. de registro:** PR-1 P. 124 No. 62. **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de textura afanítica, presenta coloraciones grises en la matriz, y un color blanco en los fragmentos embebidos en la matriz, tenemos fragmentos pequeños de vidrio y al parecer la roca presenta una ligera silicificación, presenta oxidación (goethita) y unas tonalidades blanquecinas (posiblemente de arcillas).

### II. Descripción microscópica.

Tenemos una textura piroclástica, con fragmentos de vidrio y de roca en la matriz (al parecer de la misma composición), distinguiéndose el cuarzo en cristales anhedral, y algunos fenocristales de feldespato. La roca se encuentra parcialmente silicificada.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Cuarzo	60	Formando masas de cuarzo anhedral y microcristalino en parches.
Feldespatos (sanidino)	6	Formas anhedrales embebidas en la matriz.
Matriz vítrea	30	Se presenta argilizada y ligeramente rojiza.
Opacos	Trazas	
Líticos	4	De composición similar a la matriz.
Arcillas		Con colores de birrefringencia de primer orden que deben corresponder a caolinitas.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba Tala, vítrea de matriz argilizada.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO D

**No. de registro:** PR-11 P. 150 No. 15 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de textura afanítica, de color gris claro y tonalidades blanquecinas, en algunas partes se observan líticos que tornan a la roca de un color gris más oscuro.

### II. Descripción microscópica.

Roca con textura piroclástica relicta, con una matriz vitrofírica, se observan pocos fenocristales de feldespatos y algunos al parecer de zircón. El vidrio se encuentra casi totalmente alterado a arcillas.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Sanidino	1	Se presenta como fenocristales en los fragmentos y en la matriz.
Cuarzo secundario	30	Producto de alteración del vidrio.
Vidrio	57	Forma la roca casi en su totalidad, se encuentra argilizado.
Opacos	2	Intersticiales en la matriz.
Clorita	6	Producto de alteración de los ferromagnesianos.
Epidota	2	Se presenta como parches.
Arcillas		Con colores de birrefringencia de primer orden que deben corresponder con la caolinita.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba vítrea saturada (parece de composición andesítica), muy argilizada, observándose una mayor cantidad de cuarzo secundario relleno de poros o cavidades en la roca.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO E

**No. de registro:** PR-4 P. 136. No. 68 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca con textura afanítica, de color gris oscuro, en algunas zonas se pueden observar algunos fragmentos de cuarzo y de algunos máficos. Tenemos una alteración de color blanco (arcillas).

### II. Descripción microscópica.

Roca de textura piroclástica, contituida por algunos fragmentos de feldespato y cuarzo, el vidrio se encuentra muy desvitrificado a arcillas.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Sanidino	6	Cristales subhedrales y euhedrales.
Cuarzo primario	35	Éste y el sanidino se encuentran incluidos en la matriz vítrea.
Vidrio	54	Matriz vítrea desvitrificada a cuarzo secundario.
Cuarzosecundario	5	En un mosaico micro a criptocristalino.
Arcillas		Con colores de birrefringencia de primer orden correspondientes a caolinitas.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba vítrea muy desvitrificada, pero ligeramente argilizada, feldespatos muy sanos para estar en contacto con fluido hidrotermal.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**



## ESTUDIO PETROGRÁFICO F

**No. de registro:** PR-11 P.300. No. 30. **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de textura piroclástica, terrosa, formada de fragmentos blancos en su mayoría de pómez, además presenta algunos de color oscuro, al parecer de la misma composición incluidos en una matriz de color gris claro.

### II. Descripción microscópica.

Roca de textura porfídica, con una matriz vítrea, además de fenocristales de cuarzo y de feldespatos, y algunos cristales de zircón.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Vidrio	87	Forma la matriz, encontrándose con una desvitrificación avanzada a arcillas (vidrio de composición ácida).
Cuarzo primario	5	Como fenocristal.
Sanidino	2	Se encuentra como fenocristal, aquí observamos una macla vistosa en el feldespato.
Adularia		Depositada como mineral de alteración.
Zircón	1	Tenemos un cristal de forma romboidal a cuadrada incluido en la matriz.
Opacos	2	Alterados a ferromagnesianos.
Líticos	2	De composición parecida a la matriz.
Apatita	1	Intercrecida con feldespato.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba riolítica vítrea que muestra una ligera orientación de flujo.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.

**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO G

**No. de registro:** PR-11. P.300. No.30 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Ver estudio petrográfico F.

### II. Descripción microscópica.

Roca de textura holohialina vesicular con fragmentos de vidrio y algunos líticos, algunos fenocristales de cuarzo y sanidino incluidos en una matriz vítrea muy argilizada.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Vidrio	79	Forma la matriz de composición ácida.
Cuarzo	3	Se presenta como fenocristal.
Sanidino	3	Se presenta como fenocristal.
Lítricos	15	Tenemos líticos y fragmentos de vidrio a lo largo de toda la matriz vítrea.

### IV. Clasificación y observaciones.

Se trata de una toba lítica, con un gran número de fragmentos de roca, en la que la matriz no se encuentra tan desvitrificada como en la lámina anterior.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO H

**No. de registro:** PR-12. P.600. No.60 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de textura piroclástica de color gris (color predominante en la matriz), y de líticos de color blanco y negro. La matriz es terrosa de grano muy fino.

### II. Descripción microscópica.

Roca formada por líticos de composición andesítica (esto determinado por la presencia de plagioclasas zonadas) y otros líticos completamente alterados a cuarzo secundario incluidos en una matriz en su mayor parte vítrea.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Vidrio	75	Matriz ligeramente desvitrificada.
Opacos	5	Alterándose a ferromagnesianos.
Lílicos	18	De composición andesítica y ácida (los ferromagnesianos de los fragmentos de roca se encuentran cloritizados).
Cuarzo	1	Cuarzo primario formando fenocristales.
Sanidino	2	Como fenocristal.
Calcita	2	Presente en parches.
Épidota	3	Mineral de alteración de los opacos.

### IV. Clasificación y observaciones.

Esta toba lítica parece encontrarse en la zona de contaminación de la cámara magnética entre las rocas ácidas y andesíticas.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.

**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO I

**No. de registro:** PR-1. P. 1540 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color gris oscuro, de textura afanítica, con algunas zonas de un color metálico (calcopirita). Se observa una alteración de color verde (clorita).

### II. Descripción microscópica.

Tenemos una roca de textura pilotaxítica intergranular, formada por un mosaico de microlitos, las plagioclasas se encuentran sumamente alteradas a carbonatos. Su contenido de opacos es alto y tenemos calcita abundante.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Plagioclasas	65	Formando la matriz, de composición oligoclasa-andesítica (las plagioclasas se encuentran zonadas).
Opacos	15	Fragmentos incluidos en la matriz.
Calcita	15	Presente como parches.
Ferromagnesianos	5	Se presentan cloritizados.

### IV. Clasificación y observaciones.

Andesita que presenta una alteración selectiva con los ferromagnesianos cloritizados y las plagioclasas carbonatadas.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.

**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO J

**No. de registro:** Mesa El Burro. **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de textura intergranular constituida por fragmentos de pómez y obsidiana interrecidos entre sí.

### II. Descripción microscópica.

Presenta una textura piroclástica con unos fenocristales de feldespatos, los cuales en su mayoría se encuentran rodeados por bordes de alteración.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Sanidino	7	Presenta su macla característica, algunos cristales se encuentran corroídos y algunos ligeramente alterados (arcillas).
Vidrio	84	Vidrio muy vesicular con algunas fracturas rellenas con limonita.
Opacos	3	Presencia de goethita.
Cuarzo	3	Primario como fenocristal.
Biotita	3	Como accesorio en la matriz.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba vítrea pumicítica fresca.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO K

**No. de registro:** Mesa El León. **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color negro, blanco y anaranjado, de textura afanítica formada por vidrio volcánico con fragmentos de pómez, ligeramente argilizada y limonitizada.

### II. Descripción microscópica.

Presenta una textura piroclástica, con una matriz de vidrio y fenocristales de cuarzo y sanidino.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Cuarzo	8	Primario, se encuentra como fenocristales con un alto fracturamiento.
Apatito	1	Como accesorio.
Opacos.	2	Hematita primaria.
Vidrio	89	Se encuentra formando una estructura vesicular, sus fracturas se encuentran rellenas por limonita, en algunas partes se encuentra desvitrificado a esferulitas de cuarzo microcristalino.

### IV. Clasificación y observaciones.

Pómez fresca.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO L

**No. de registro:** Horizonte P.G. **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca pumicítica porfirítica gris con algunos fenocristales de cuarzo y feldespatos, con ligeras tonalidades cremas de alteración argílica.

### II. Descripción microscópica.

Tenemos una textura porfirítica con una matriz vítrea constituida por fragmentos angulosos y algunos fenocristales de cuarzo sanidino y hornblenda.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Vidrio	83	Vidrio vesicular de composición ácida formado por fragmentos muy angulosos, que no presentan visible alteración.
Sanidino	5	Se encuentra muy fracturado.
Cuarzo	5	Redondeado y fracturado como fenocristal en la matriz.
Hornblenda	3	De color verde característico.
Opacos	2	Como fenocristales formadores de la matriz.

### IV. Clasificación y observaciones.

Pómez alífrica gris bastante sana y libre de alteración.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

**ESTUDIO PETROGRÁFICO M**

**No. de registro:** Cerro Planillas. **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa Maria Prol e Ing. Alfredo Victoria.

**I. Descripción megascópica.**  
Roca de textura afanítica de color rosado, con algunas coloraciones blancas de arcillas y algunas rojizas de hematita.

**II. Descripción microscópica.**  
Tenemos una textura piroclástica relictas, con una matriz vítrea totalmente argilizada.

**III. Mineralogía.**

Mineral	%	Características
Vidrio	97	Se encuentra formado por cristales aciculares, alterado por la presencia de cuarzo microcristalino, y casi totalmente argilizado.
Opacos	3	Correspondientes a la hematita observada en la muestra de mano.

**IV. Clasificación y observaciones.**  
Roca sobresaturada completamente argilizada.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**



## ESTUDIO PETROGRÁFICO N

**No. de registro:** Cerro El Colli. **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color negro y gris, formada en su totalidad de vidrio (obsidiana) y fragmentos de pómez.

### II. Descripción microscópica.

Roca de textura holohialina poco alterada.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Vidrio	100	Vidrio desvitrificado con la presencia en la matriz de opacos (2%), esferulitas de ortoclasa y cristobalita y cristales de cuarzo microcristalino (<1%).

### IV. Clasificación y observaciones.

Obsidiana fresca, con algunos horizontes ligeramente desvitrificados.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO O

**No. de registro:** PR-5. P. 200 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color crema a blanca con algunas tonalidades rojizas, con una textura piroclástica, constituida por fragmentos de pómez argilizados en una matriz fluidal con algunas oquedades rellenas de cuarzo secundario.

### II. Descripción microscópica.

Presenta una textura vitrofírica relictas, constituida por algunos fenocristales de feldespatos, en una matriz vítrea.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Vidrio	91	Vidrio desvitrificado, argilizado y con una silicificación presente en algunos cristales aciculares.
Sanidino	3	Cristales muy alterados argilizados, algunos ya sólo presentan su forma relictas.
Cuarzo primario	2	Fragmentos corroídos que sobrevivieron a la alteración.
Opacos	4	Pequeños cristales embebidos en la matriz, algunos de color rojo.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba riolítica muy alterada, que corresponde con la Toba Tala, se encuentra silicificada y argilizada.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO O

**No. de registro:** PR-5, P. 200 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prof e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color crema a blanca con algunas tonalidades rojizas, con una textura piroclástica, constituida por fragmentos de pómez argilizados en una matriz fluidal con algunas oquedades rellenas de cuarzo secundario.

### II. Descripción microscópica.

Presenta una textura vitrofírica relictas, constituida por algunos fenocristales de feldespatos, en una matriz vítrea.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Vidrio	91	Vidrio desvitrificado, argilizado y con una silicificación presente en algunos cristales aciculares.
Sanidino	3	Cristales muy alterados argilizados, algunos ya sólo presentan su forma relictas.
Cuarzo primario	2	Fragmentos corroídos que sobrevivieron a la alteración.
Opacos	4	Pequeños cristales embebidos en la matriz, algunos de color rojo.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba riolítica muy alterada, que corresponde con la Toba Tala, se encuentra silicificada y argilizada.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO P

**No. de registro:** PR-9. P. 605 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa Marín Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca con textura piroclástica, con líticos y matriz totalmente argilizados.

### II. Descripción microscópica.

Roca de textura piroclástica, con una matriz vítrea totalmente argilizada.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Vidrio	89	Se encuentra totalmente argilizado.
Cuarzo	10	De origen primario y también microcristalino, aunque este último en menor cantidad.
Zircón	1	Como mineral accesorio.
Lítics	5	Algunos fragmentos se encuentran alterados a arcillas y con presencia de óxidos de fierro, además se reconocen fragmentos de composición andesítica y ácida en la matriz.
Opacos	4	Como producto de alteración.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba litica totalmente argilizada.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO Q

**No. de registro:** PR-1. P. 910 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color gris verdoso de textura piroclástica con fragmentos de líticos, algunos fenocristales de cuarzo y tonalidades verdosas de clorita.

### II. Descripción microscópica.

Roca con textura piroclástica, con fragmentos de líticos y fenocristales de cuarzo y plagioclasas.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Plagioclasas	7	Algunas se encuentran argilizadas, zonadas, los que nos da su carácter andesítico.
Cuarzo	5	Fenocristales amiboides redondeados.
Líticos	4	Presentan bordes de alteración de óxidos de fierro y algunos se encuentran argilizados.
Opacos	4	Algunos primarios y otros formados como producto de alteración de algunos líticos.
Calcita	4	Presente como parches en la roca.
Vidrio	75	Vidrio desvitrificado y muy alterado a arcillas.
Apatito	1	Como inclusiones en plagioclasas.

### IV. Clasificación y observaciones.

Toba lítica en un estado de alteración avanzada.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO R

**No. de registro:** PR-11 P. 1720S **Localidad:** La Primavera, Jalisco.  
**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color negro con tonalidades verdosas, de textura fanerítica de grano fino con fenocristales de plagioclasas y ferromagnesianos, presenta pequeñas vetillas de calcita, además de clorita y epidota como minerales de alteración.

### II. Descripción microscópica.

Presenta una textura intergranular con una matriz muy alterada y ferromagnesianos intersticiales alterados.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Plagioclasas	85	Se encuentran zonadas y muy argilizadas.
Calcita	1	Como parches.
Ferromagnesianos	4	Todos totalmente cloritizados.
Epidota	6	Producto de alteración presente como parches.
Opacos	4	Alterados a óxidos de hierro.

### IV. Clasificación y observaciones.

Andesita con alteración propilitica presente.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO S

**No. de registro:** PR-11. P.1720A **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color gris, de textura fanerítica de grano fino con fenocristales de feldspatos y ferromagnesianos incluidos en la matriz, con muchas oquedades rellenas de calcita bandeada y con tonalidades verdes debidas a la clorita.

### II. Descripción microscópica.

Roca de textura intergranular, constituida por plagioclasas argilizadas.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Ferromagnesianos	5	Cloritizados y hematizados.
Olivino	4	Con cristales euhedrales y alterado.
Opacos	5	Intersticiales y alterados.
Cuarzo secundario	5	Cuarzo microcristalino de origen secundario asociado a las fracturas y como parches.
Plagioclasas	80	Matriz de plagioclasas zonadas y argilizadas intensamente.
Calcita	1	Como parche.

### IV. Clasificación y observaciones.

Andesita con oquedades de calcita, alterada.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.  
**Responsable del estudio.**

## ESTUDIO PETROGRÁFICO T

**No. de registro:** PR-12 P. 2303 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa Maria Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de textura piroclástica, con fenocristales de ferromagnesianos, cloritizada y con algunas vetillas rellenas de calcita.

### II. Descripción microscópica.

Roca de textura intergranular, que permite observar una matriz muy alterada y algunos fenocristales de plagioclasas.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Epidota-clorita	15	Producto de alteración de las plagioclasas.
Calcita	5	Como parches.
Vidrio	63	Severamente argilizado.
Plagioclasas	17	Alterándose a epidota-clorita y arcillas.

### IV. Clasificación y observaciones.

Andesita severamente alterada a epidota, calcita y clorita.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.

**Responsable del estudio.**



## ESTUDIO PETROGRÁFICO U

**No. de registro:** PR-9 P. 2985 **Localidad:** La Primavera, Jalisco.

**Remitente:** Dra. Rosa María Prol e Ing. Alfredo Victoria.

### I. Descripción megascópica.

Roca de color gris con tonalidades verdes, de textura fanerítica de grano medio con fenocristales de feldespatos, ferromagnesianos y cuarzo. Presenta alteración a clorita, epidota, calcita y arcillas.

### II. Descripción microscópica.

Roca de textura holocristalina epidiomórfica intergranular con un marcado grado de alteración.

### III. Mineralogía.

Mineral	%	Características
Plagioclasas	22	Albitizadas y macladas, menos alteradas que los feldespatos.
Feldespatos K	15	Se encuentra sericitizado severamente.
Biotita	10	Se encuentra cloritizada y como fenocristales en la matriz.
Opacos	9	Intersticiales y alterados.
Cuarzo	38	Se encuentra corroído.
Calcita	7	Como parches.
Epidota-clorita	13	Producto de alteración hidrotermal de los ferromagnesianos y de los feldespatos.

### IV. Clasificación y observaciones.

Granito alterado a epidota, clorita y calcita.

Hernández Lombardini Sergio Ignacio.

**Responsable del estudio.**