

# Ocurrencia de rocas ígneas y su relación genética con la evolución tectónica de la cuenca transtensional en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Víctor Ilitch Gallardo Federico

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectrivos, Residencia General de Cerro Prieto. Correo: [victor.gallardo01@cfegob.mx](mailto:victor.gallardo01@cfegob.mx)

## Resumen

La perforación de pozos al este del campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), Baja California, ha proporcionado valiosa información para analizar la evolución tectónica de la cuenca transtensional donde se encuentra el yacimiento geotérmico. Un total de 38 pozos perforados entre 2009 y 2014 han cortado cerca de 130 cuerpos ígneos cuya continuidad y espesores varían considerablemente. Este trabajo consistió en clasificar muestras de ripios y núcleos e integrar la información, incluyendo una nueva revisión de las rocas ígneas reportadas. Mediante descripciones petrológicas se han identificado dos grupos: rocas volcánicas de origen fisural y rocas intrusivas de emplazamiento hipabísal. Las rocas volcánicas fisurales presentan texturas vitrofídicas con fenocristales de plagioclásas, esporádicos cristales de olivino, presencia de vesículas y amígdalas llenas de calcita. Muestran estructuras de desgasificación que se asocian con posibles derrames fisurales cubiertos después por material terrígeno proveniente de diferentes etapas de depósito del Río Colorado, parte de la unidad litológica llamada Sedimentos Clásticos No Consolidados (SCNC). Los derrames se enfriaron rápidamente formando vidrio. Se estiman que los derrames estarían genéticamente relacionados con la evolución tectónica de la cuenca transtensional, siendo por tanto de tipo sinsedimentario, formados por una cámara magmática profunda que puede ser la misma fuente de calor del CGCP. Por su parte, las rocas intrusivas (hipabisales) se han encontrado como diques cortando a las unidades litológicas consolidadas (lutita gris, areniscas y lutitas color café) y alterándolas para dar lugar a silicificación con metamorfismo de contacto de bajo grado e incipiente a moderada alteración hidrotermal. Estos cuerpos hipabisales presentan texturas microfídicas con fenocristales de plagioclásas y minerales visibles de piroxenos. Se describen tres muestras seleccionadas de los 130 cuerpos identificados, una de las cuales es una roca volcánica vítreo obtenida en el pozo 524D a 1635 m, y dos son rocas hipabisales en los pozos 529D a 3487 m y 528D a 3281 m de profundidad. Con el análisis de esta información, se continuará enriqueciendo el modelo geológico del CGCP y se precisarán las distintas etapas evolutivas de la cuenca mediante el estudio de las características petrológicas de los cuerpos ígneos y su probable relación con una cámara magmática que ha tenido diferentes etapas de emplazamiento, lo que de manera indirecta contribuirá a definir mejores estrategias para sostener y mejorar la producción de vapor para las unidades en operación.

*Palabras clave:* Geología del subsuelo, petrografía, diques, derrames fisurales synsedimentarios, porción oriental de Cerro Prieto, evolución de la cuenca.

## 1. Objetivo

El objetivo general del presente trabajo es continuar ampliando nuestro conocimiento sobre la dinámica del sistema geotérmico del CGCP, específicamente en lo concerniente al posible origen de la fuente de calor, su relación genética asociada a la ocurrencia de rocas ígneas y con ello actualizar el modelo geológico del CGCP.

Los objetivos particulares de este trabajo son los siguientes:

- a) Determinar el origen de las rocas ígneas y compararlas con estudios previos para determinar su posible afinidad petrológica.
- b) Discutir la naturaleza de estas rocas dentro del patrón tectónico local (centro de dispersión) y su posible relación con una cámara magmática profunda asociada a la fuente de calor del CGCP.
- c) Tener una mejor comprensión de la zona geotérmica ubicada al este de los límites productivos del campo.

## 2. Antecedentes

En la cuenca transtensional donde se ubica el CGCP se han perforado aproximadamente 430 pozos geotérmicos, los cuales han cortado diferentes unidades geológicas. Desde su descubrimiento en 1958, las muestras de roca obtenidas se han descrito detalladamente en microscopios petrológicos y como resultado se han elaborado columnas litológicas que brindan un apoyo muy importante para conocer el subsuelo, siendo esta una actividad preponderante que se continúa realizando hasta hoy en día.

Geólogos adscritos a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) han reportado la ocurrencia de FRI (fragmentos de rocas ígneas) en ripios, tanto en la secuencia sedimentaria terrígena denominada informalmente SCNC (sedimentos clásticos no consolidados) como en la UC (unidad consolidada) compuesta por lutita café en su cima y alternancias de lutitas limolíticas color gris intercaladas con areniscas en su base, descansando discordantemente sobre un basamento granítico-granodiorítico. Por su parte, rocas intrusivas se han reportado en afloramientos en superficie (Sierra Cucapah y Centinela) y en cinco pozos geotérmicos dentro del CGCP.

En 1980 Elders interpreta que la fuente de calor del CGCP podría ser una intrusión de composición gabroica o basáltica, de forma de embudo o cono invertido, con una anchura en su cima de 4 km, a 5 km de profundidad y emplazada hace unos 30 mil o 40 mil años; establece también un desplazamiento vertical de unos 10 cm por año desde el centro de dispersión. Existen dos razones convincentes para suponer que la fuente de calor en el CGCP pueden ser intrusiones de origen basáltico (Elders, et al., 1984). La primera es que los diques encontrados o localizados en los pozos profundos son en gran parte de composición diabásica, y la segunda es que en este tipo de ambiente tectónico, conocido como de dispersión de corteza y asociado a fallas transformantes de goteo, las intrusiones basálticas son muy comunes.

Elders y otros (1984) mencionan que existe una anomalía térmica, la cual está situada en una cuenca transtensional (*pull-apart basin*) entre las fallas Imperial y Cerro Prieto. Si estas fallas tienen razones de movimiento comparables a las deformaciones de los márgenes de placa (*plate edge deformations*) medidas en la boca del Golfo de California, de 5 cm/año, con una tasa extensión de 10 cm/año para el centro de dispersión, y si la cuenca se extendiese a este ritmo, tendría un desplazamiento de un kilómetro cada 10 mil años. Como la distancia que separa la falla Cerro Prieto de la Imperial es de alrededor de 15 km, esto requiere añadir un prisma de corteza nueva de 1 km de ancho, 15 km de largo y hasta 20 km de profundidad por cada 10 mil años.

En 1990, Quintana, con base al análisis de información de ripios de varios pozos del CGCP (M-194, M-112, M-201, M-203, M-205, M-206, E-30, NL-1, GV-2 y T-350), clasificó las muestras en cuatro grupos: 1) basalto, 2) basaltos-andesitas, 3) andesitas y 4) dacitas. Por su parte, González (1995) analizó los pozos E-30 y T-350, e identificó cuerpos basálticos de augita e hiperstena.

En 1996 Corona describió cuerpos que intrusionan a los SCNC en el pozo M-205, e infirió que son contemporáneos al vulcanismo del volcán Cerro Prieto (lo cual no se ha comprobado hasta la fecha). Además los interpretó como diques que se emplazaron a través de fallas que cortan el basamento y que a su vez son los medios principales de aporte de calor al reservorio geotérmico. En 1996, Quintanilla y Suárez mencionan que las evidencias térmicas, geológico-tectónicas y magnéticas han sido las bases para postular que existe una fuente de calor asociada a cuerpos magmáticos, similares a los que ocurren en un centro de dispersión típicamente oceánico. Ellos realizaron estudios petrográficos y geoquímicos clasificando a las rocas como basaltos, basaltos-andesitas, andesitas y dacitas, asociándolas a un modelo petrogenético de ambiente intrusivo.

El origen y localización de la fuente de calor del yacimiento de Cerro Prieto es aún materia de investigación. El estudio de las rocas ígneas presentes en los pozos provee valiosa información sobre las variaciones espaciales y temporales de sus emplazamientos, la composición química y la petrogénesis, que están relacionados a procesos magmáticos y tectónicos que se han estado llevando a cabo. La importancia de este estudio es asociar el vulcanismo histórico dentro de la cuenca con los procesos de generación magmática, y entender su evolución e interacción con la fuente de calor del yacimiento.

### 3. Localización y metodología

El CGCP se localiza en el Valle de Mexicali, Baja California, situado aproximadamente a 26 km al sureste de la ciudad de Mexicali (Figura 1); destaca el volcán Cerro Prieto siendo la estructura más sobresaliente de la zona.

El presente trabajo está basado en los siguientes puntos:

- Clasificación de rocas (muestras de ripios y núcleos) reportadas en la perforación de pozos.
- Integración de la información y revisión de las rocas ígneas reportadas.

### 4. Ocurrencia de fragmentos de rocas volcánicas

Los fragmentos de rocas ígneas (FRI) en las unidades atravesadas por los pozos perforados en el CGCP varían en porcentaje, desde menos del 1% (trazas) formando parte de agregados dentro de los SCNC. En la literatura se menciona que los fragmentos de roca forman parte de los constituyentes esenciales de los sedimentos en general. Estos pueden ser de cualquier tipo de roca y sugieren que los cuerpos ígneos de los cuales provienen se encuentran cercanos a su fuente de origen. El tipo de FRI generalmente varía entre 2 y 5 mm de diámetro, su textura es afanítica de criptocristalina a microcristalina o típicamente holohialina, son subangulares a angulares, e indican poca abrasión (Figuras 2a y 2b).

Los fragmentos de rocas volcánicas presentan colores que varían de negro a gris claro, en ocasiones y de forma esporádica en color rosa, y son muy heterogéneas en cuanto a su composición. Se han reportado cantidades porcentuales de FRI dentro de los SCNC, con porcentajes mayores al 30% (ver Figura 3), y pueden llegar a ser hasta un 100% del total de ripios. Puede interpretarse que los mayores porcentajes se deben al corte de estructuras relacionadas a rocas lávicas con textura vítreo, cuyo patrón

de cristalinidad varía de holohialinas a holocristalinas, indicando enfriamiento rápido y formación de cristales de plagioclasa en suspensión.

Los tipos de FRI mencionados fueron considerados como provenientes de ambientes sub-volcánicos hipabisales, tipo diques, sills y lacolitos por otros autores, debido a que se reportaron dentro de la unidad de SCNC. Sin embargo, en este trabajo se interpreta que por el tipo de textura presente (vítreo, vesicular y amigdalar), se asocian a derrames volcánicos fisurales (tipo lávicas). La presencia del vidrio es un indicador de formación por enfriamiento rápido por contacto con la paleo-superficie del terreno, las vesículas y amígdalas reflejan desgasificación del magma en un ambiente expuesto en superficie, permitiendo la cristalización secundaria de calcita por eventos tardíos de los mismos gases.

Se han hallado FRI de origen volcánico en 38 pozos del CGCP a diferentes profundidades, que van desde los 27 m en el pozo 529D (10-30% del total de la muestra) hasta los 2300 m en el pozo M-205 (30-60% del total de la muestra). Sus espesores también varían considerablemente.

En el pozo 524D se seleccionaron muestras de canal con FRI volcánicas a una profundidad de 1635 m. Se realizó una lámina delgada para determinar su clasificación. Dada la mineralogía observada se determinó que la roca contiene un 70% de vidrio volcánico oscuro y 30% de fenocristales de plagioclasa con textura hialopilitica. De acuerdo a su análisis mineralógico se clasificó como una andesita de augita con textura vítreo y vesicular. Esta muestra es en general representativa de los FRI hallados en los SCNC, que son esencialmente rocas volcánicas emplazadas y formadas durante la deposición terrígena.

## 5. Ocurrencia de fragmentos de rocas ígneas intrusivas (hipabisales)

FRI (hipabisales) con porcentajes mayores al 30% del total de la muestra de canal, se identificaron cortando a las rocas consolidadas de la UC. Estos presentan textura fanerítica, equigranular a porfírica, con cristales de grano fino a medio en su matriz y fenocristales de plagioclasa. Su tonalidad oscura varía entre mesocráticas (35-65%) a melanocráticas (65-90%) producto de su contenido de minerales máficos (ver Figura 4). En el pozo 528D, a una profundidad de 3281 m, se cortó un núcleo que fue analizado bajo el microscopio petrográfico, observándose un 55% de areniscas y lutitas limolíticas silicificadas (roca encajonante) con alteración hidrotermal (minerales aciculares incoloros) y la presencia de granates color café (grosularita) en fracturas. El 45% restante de la muestra corresponde a una roca ígnea intrusiva de color gris medio, con textura fanerítica (intergranular). En este núcleo se observa que la roca forma parte de un dique cuyo emplazamiento alteró a la roca encajonante, formando grosularita por metamorfismo de contacto (Figura 5).

El análisis petrográfico de esos fragmentos ígneos intrusivos revela que se trata de una diabasa de augita, con presencia de augita titanífera, fenocristales de plagioclasa cálcica de tipo labradorita-bitownita, olivino eutéctico, ortoclasa con textura gráfica y presencia de minerales opacos (ilmenita nucleada), clorita secundaria de origen hidrotermal (peninita) y cuarzo intersticial tardío de tipo hidrotermal (ver Figura 6).

En el pozo 529D se recuperó un núcleo a 3483 m de profundidad, de cual se realizó análisis petrográfico (Figuras 7 y 8). La roca ígnea es de textura microfídica, color gris medio y variación textural decreciente desde su cima hasta su base. Contiene un xenolito de color oscuro, con variación textural tipo hornfels (areniscas y lutitas metamorfizadas). Se identificó fracturamiento abierto

perpendicular a la longitud del núcleo y un fracturamiento vertical con alteración hidrotermal (cloritización-silicificación) que incluye fragmentos de tipo brechoide. En la zona intensamente fracturada se observa la lutita limolítica y areniscas metamorfizadas tipo hornfels. Es posible que la roca ígnea microfídica corresponda a un dique intermedio a básico de ambiente hipabísal.

## 6. Distribución areal y espacial de los cuerpos ígneos

La ocurrencia de FRI tanto volcánicas como hipabisales indica un panorama de una intensa actividad magmática durante la evolución, formación y subsidencia de la cuenca. Las rocas lávicas fueron emplazadas y depositadas mediante fisuras en distintas periodos de tiempo y posteriormente fueron cubiertas por material terrígeno fluviodeltaico proveniente del Río Colorado. Estos eventos sinsedimentarios con una alta tasa de sedimentación se presentaron en 38 pozos, perforados entre 2009 y 2014. Resultado de la ocurrencia de esos cuerpos se realizó una distribución areal de los derrames fisurales a diferentes profundidades (Figura 9).

Esas lavas vítreas están ampliamente distribuidas en grandes extensiones dentro del CGCP. Entre los 1500 y 1600 m de profundidad el espesor promedio resultó ser de 65 m. Fragmentos de este tipo se encontraron en 15 de los 38 pozos analizados. Así mismo se identificaron más intervalos con ocurrencia de rocas volcánicas, destacando el pozo M-205 que cortó el derrame fisural más profundo, y por lo tanto más antiguo (Figura 10).

También se han hallado rocas hipabisales en los SCNC, pero en porcentajes menores al 1% (trazas). Por ello se consideran parte de los conductos por los que subieron los derrames fisurales. La interpretación de la relación genética de estos cuerpos con la evolución tectónica de la cuenca, sugiere que los emplazamientos son sinsedimentarios, es decir que ocurrieron durante la sedimentación y subsidencia tectónica. En particular, Gallardo (2012) menciona que fueron emplazados durante la etapa transtensional.

Los cuerpos diabásicos con sus derivados extrusivos o volcánicos, forman parte de un cuerpo profundo, relacionado al acercamiento de la astenosfera y producido por el adelgazamiento cortical en la zona de la cuenca transtensional. Además, pueden estar relacionado a la fuente de calor del sistema geotérmico del CGCP.

Esas rocas ígneas intrusivas se han cortado en los pozos: M-194, M-112, M-201, M-203, M-205, M-206, E-30, NL-1, GV-2 y T-350. En muestras de esos fragmentos se realizaron estudios geoquímicos de elementos mayores y trazas, que arrojaron valiosa información sobre la evolución magmática de la zona. Los fragmentos, tanto los pocos hallados en los SCNC como los que intrusionan a la UC, fueron clasificados como partes de diques o sills.

Los resultados de los análisis químicos de esos fragmentos obtenidos de los pozos mencionados, de acuerdo al diagrama de Cox, implican una fuente magmática primaria de composición basáltica y profunda, con diferenciación magmática que da lugar a andesitas basálticas, andesitas y dacitas. El magma padre tuvo una afinidad sub-alcalina en su etapa primaria (magmas basálticos) a transicional (andesita). Sin embargo, la composición química de las andesitas también es producto de mezclas magmáticas más someras, que dieron lugar a magmas contaminados y finalmente a rocas intermedias.

En general, los análisis de los fragmentos provenientes de los 38 pozos mencionados presentan una composición predominantemente andesítica para los eventos volcánicos de tipo derrame fisural emplazados en los SCNC (más someros), mientras que los cuerpos ígneos hipabisales (más profundos)

presentan una composición dolerítica o diabásica. Para comprender la distribución areal y temporal de los cuerpos encontrados en los pozos, se realizaron dos secciones geológicas (Figura 11), mostrándose en ambas la distribución de los cuerpos volcánicos fisurales y de los hipabisales.

Los derrames volcánicos encontrados en los pozos debieron haberse emplazado y depositado a través de zonas de debilidad cortical (fisuras), dando una idea clara de su distribución espacio-temporal y de la actividad tectónica y magmática que ha estado presente a lo largo de la evolución de la cuenca. Los derrames ocurren en la secuencia de SCNC y se emplazaron a través de fisuras durante la etapa transtensional, en un ambiente sín sedimentario.

El modelo geológico hipotético de la ocurrencia de las rocas ígneas, tanto volcánicas como hipabisales, se presenta en la Figura 12.

Las rocas volcánicas más profundas se encontraron en el pozo M-205, a una profundidad promedio de 2250 m. Asumiendo una tasa de subsidencia tectónica de la cuenca de aproximadamente 10 mm/año (dato promedio basado en estudios previos), se puede inferir que los eventos fisurales volcánicos más antiguos se formaron hace 225 mil años, mientras que los derrames fisurales encontrados entre 1500 y 1600 m tuvieron su máximo episodio eruptivo y fisural hace unos 155 mil años.

Al derrame más reciente, encontrado a 27 m de profundidad en el pozo 529D, se le estima una edad de 2700 años. Es decir, los episodios eruptivos habrían ocurrido entre 225 mil y 2700 años de actividad magmática y tectónica en la cuenca.

Es probable que exista una estrecha relación entre estos emplazamientos ígneos con la fuente de calor, pues esta es la que los ha estado alimentando y emplazando a través del tiempo en una zona de adelgazamiento cortical y levantamiento astenosférico, asociado a la cuenca transtensional. Así, la composición química y petrológica de las rocas, muestra diferentes etapas de diferenciación y mezclas magmáticas relacionadas con la actual fuente de calor del CGCP.

## 7. Discusión y conclusiones

- Se determinó que la gran mayoría de las rocas ígneas encontradas en los SCNC presentan características texturales de rocas lávicas que fueron emplazadas por medio de fisuras formando derrames con rápido enfriamiento. Todas ellas presentan vidrio, vesículas y amígdalas llenas de calcita, que son evidencia de su ambiente de formación.
- Los cuerpos ígneos hipabisales, tipo dique, encontrados en los SCNC en muy escasa proporción, forman parte de los conductos a través de los cuales fluyeron y se emplazaron las rocas volcánicas fisurales. También cortan a la UC, alterando y formando minerales de metamorfismo de contacto, como granate (grosularita). Estos cuerpos hipabisales presentan la típica textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa con matriz microcristalina.
- Las rocas ígneas volcánicas son rocas intermedias de composición andesítica, mientras que las rocas hipabisales presentan una composición dolerítica o diabásica.
- En el pozo M-205 se reportaron rocas volcánicas a una profundidad promedio de 2250 m, siendo estas las más profundas. En el pozo 529D se cortaron esas mismas rocas a 27 m de profundidad. Ello implica que la primera actividad volcánica en la cuenca ocurrió hace unos 225 mil años, y la más reciente hace 2700 años.
- El magma primario original es de tipo basáltico, pero han ocurrido procesos de diferencias y mezcla magmática, que han dado lugar a rocas andesíticas y dacíticas.

- Las rocas volcánicas se emplazaron a través de fisuras o zonas de debilidad y se depositaron durante la subsidencia natural de la cuenca, de manera sinsedimentaria.
- Se recomienda realizar fechamientos para conocer mejor la evolución magmática y edad de emplazamiento.

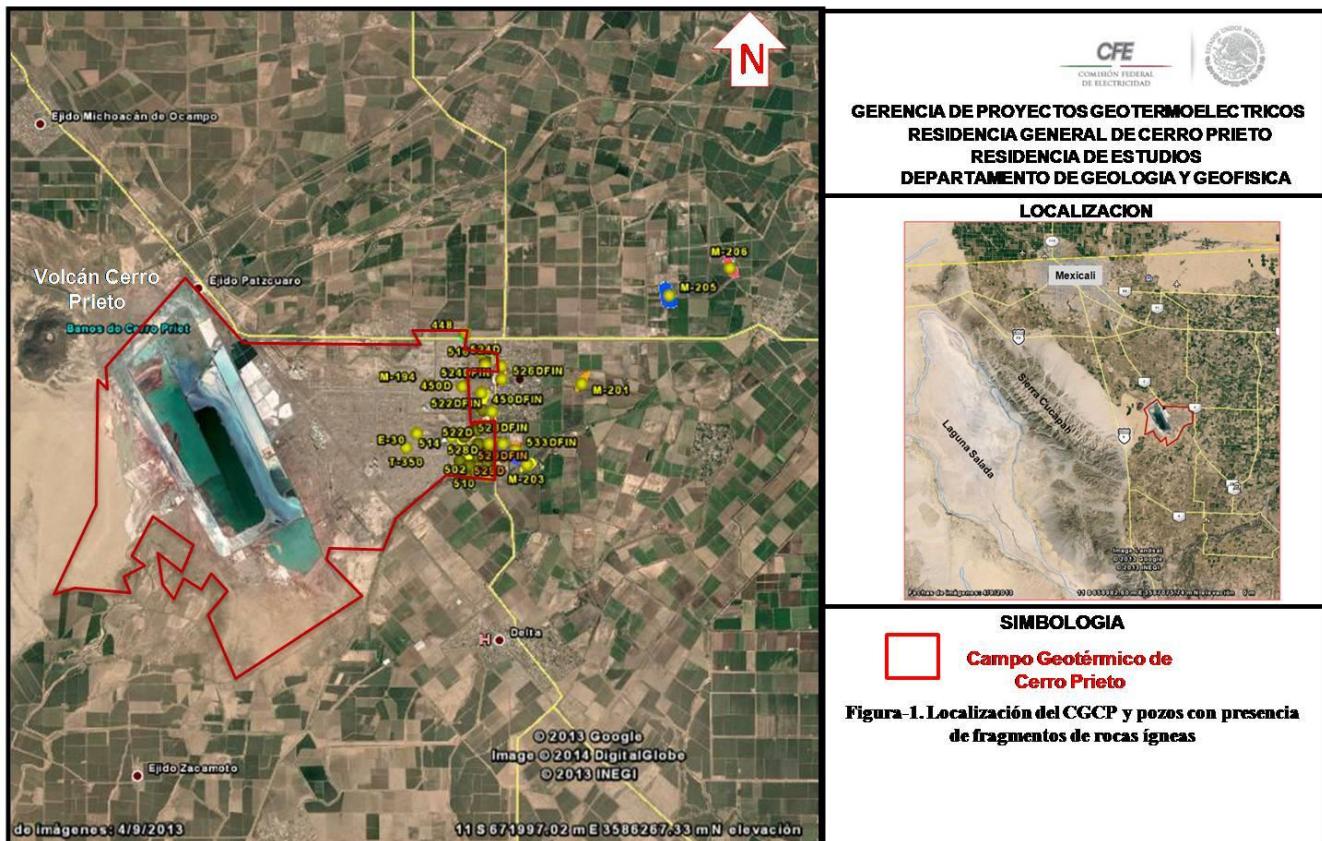
## Agradecimientos

El presente trabajo se realizó con información técnica que se ha estado generando dentro de CFE. Agradezco plenamente la oportunidad que me brindan mis superiores por presentar información de suma importancia técnica, la cual forma parte de nuestro compromiso por producir vapor y generar energía limpia y sustentable. Mi agradecimiento a los ingenieros Álvaro Aguilar Dumas, Residente de Estudios, Griselda Macías Valdez, encargada del Dpto. de Geología y Geofísica, y Marco Helio Rodríguez, Jefe del Dpto. de Yacimientos, por el interés y discusión de esta información para un mejor entendimiento de los orígenes de este sistema geotérmico.

## Referencias

- Corona R., M., 1996. Actualización del Modelo Geológico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Reporte técnico interno de la CFE No. RE-009/96. Junio de 1996. Inédito.
- Elders, W.A., 1980. Magma hydrothermal systems in a sediment smothered crustal spreading regime: the Salton Trough. Sym. on magma-hydrothermal systems. *EOS*, 61(46): p. 1149.
- Elders, W.A., Bird, D.K., and Schiffman, S., 1984. Hydrothermal flow regime and magmatic heatsource of the Cerro Prieto geothermal system, Baja California, Mexico. *Geothermics*, v. 13, pp. 27-47.
- Elders, W.A., et al., 1997. What Lies Beneath the Cerro Prieto Geothermal Field. *Geothermal Resources Concil Transactions*, Vol. 21, September/October 1997.
- Gallardo, V.I., et al., 2012. Actualización del Modelo Geológico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto y Áreas Adyacentes. CFE, *Memorias de la VI Reunión Interna de Mejora Continua*, Morelia, Michoacán.
- González P., E., 1995. Estudio de petrografía y mineralogía hidrotermal en muestras de ripio de los pozos E-30 y T-350, Cerro Prieto, B.C. Informes internos del IIE para la CFE. Inéditos.
- Quintanilla M., A.L., 1990. Caracterización tectónica del campo geotérmico de Cerro Prieto con base en el análisis petrológico y magnético de subsuelo. Informe interno para la CFE, Febrero de 1990. Inédito.
- Quintanilla M., A.L., y Suárez V., F., 1996. Cerro Prieto y su correlación con los centros de dispersión del Golfo de California. Informe interno para la CFE. Inédito.

(Figuras en páginas siguientes)



**Figura-1.** Localización del CGCP y pozos con presencia de fragmentos de rocas ígneas.

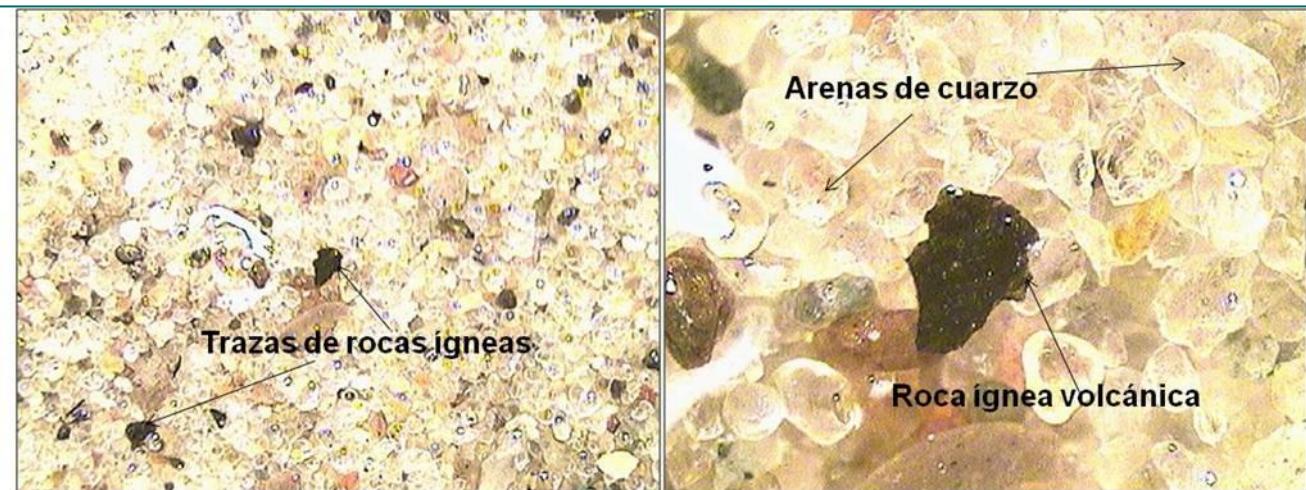


Figura-2a. Presencia de FRI volcánicas reportadas en pozos del CGCP dentro de los SCNC. Tomada del pozo 529D a 27 m de profundidad.

Figura-2b. Imagen con aumento (30x) de los SCNC bien redondeados. La roca ígnea se presenta subangular a angulosa.

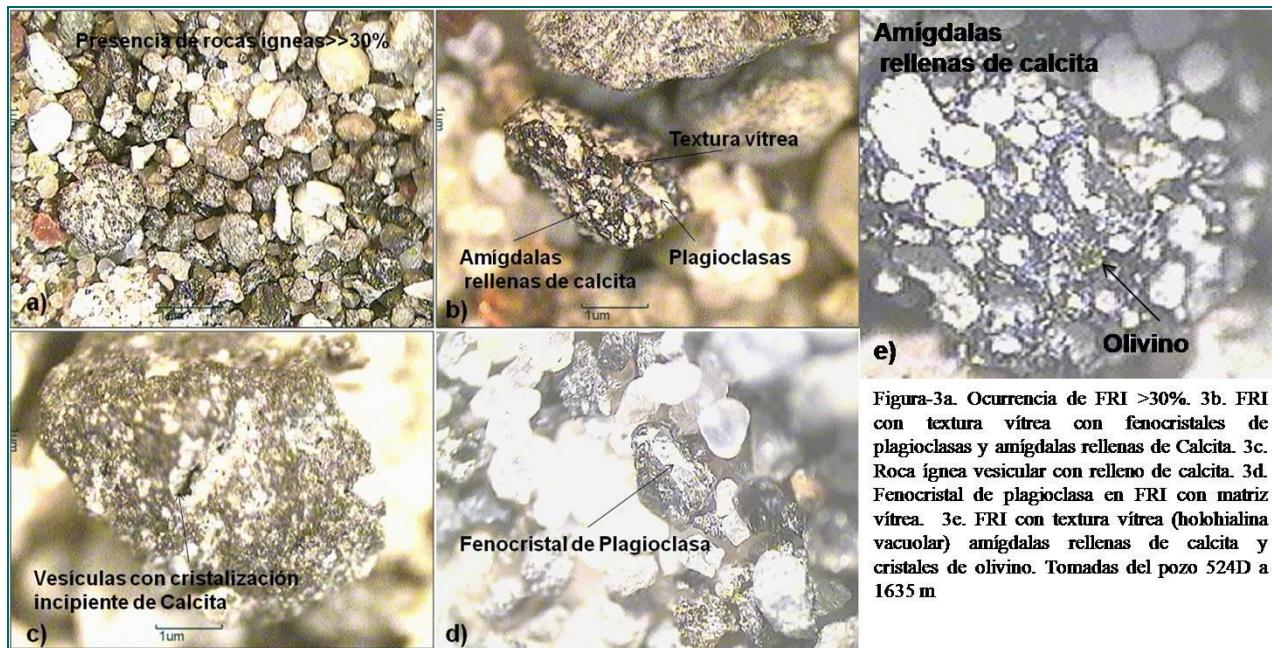


Figura-3a. Ocurrencia de FRI >30%. 3b. FRI con textura vítrea con fenocristales de plagioclases y amígdalas llenas de Calcita. 3c. Roca ígnea vesicular con relleno de calcita. 3d. Fenocristal de plagioclasa en FRI con matriz vítreo. 3e. FRI con textura vítreo (holohialina vacuolar) amígdalas llenas de calcita y cristales de olivino. Tomadas del pozo 524D a 1635 m

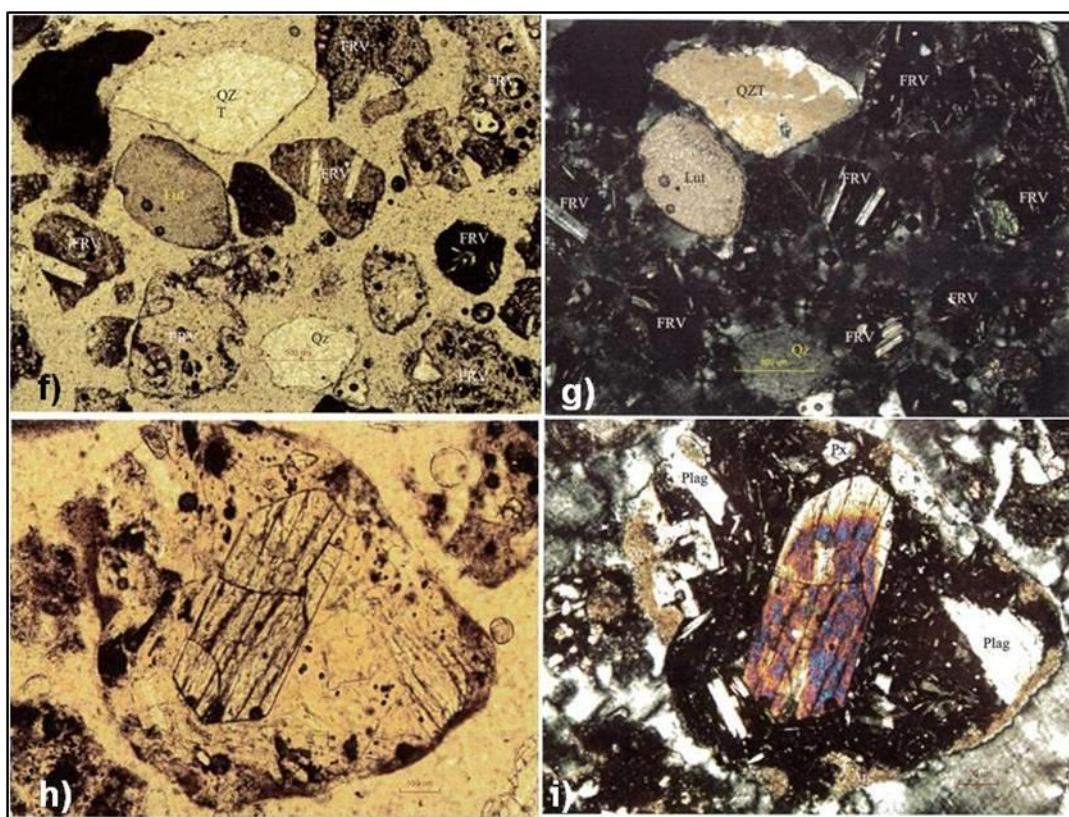


Figura-3f. Pozo 511 a 1596 m de profundidad. Aspecto general con luz polarizada plana. 3g. Imagen con nícoles cruzados apreciándose fragmentos vítreos con fenocristales de plagioclasa. 3h. Fragmentos de roca con piroxenos (al centro) y plagioclases con matriz microlítica-vítreo. 3i. Presencia de arcillas en los bordes del grano y reemplazamiento en plagioclasa

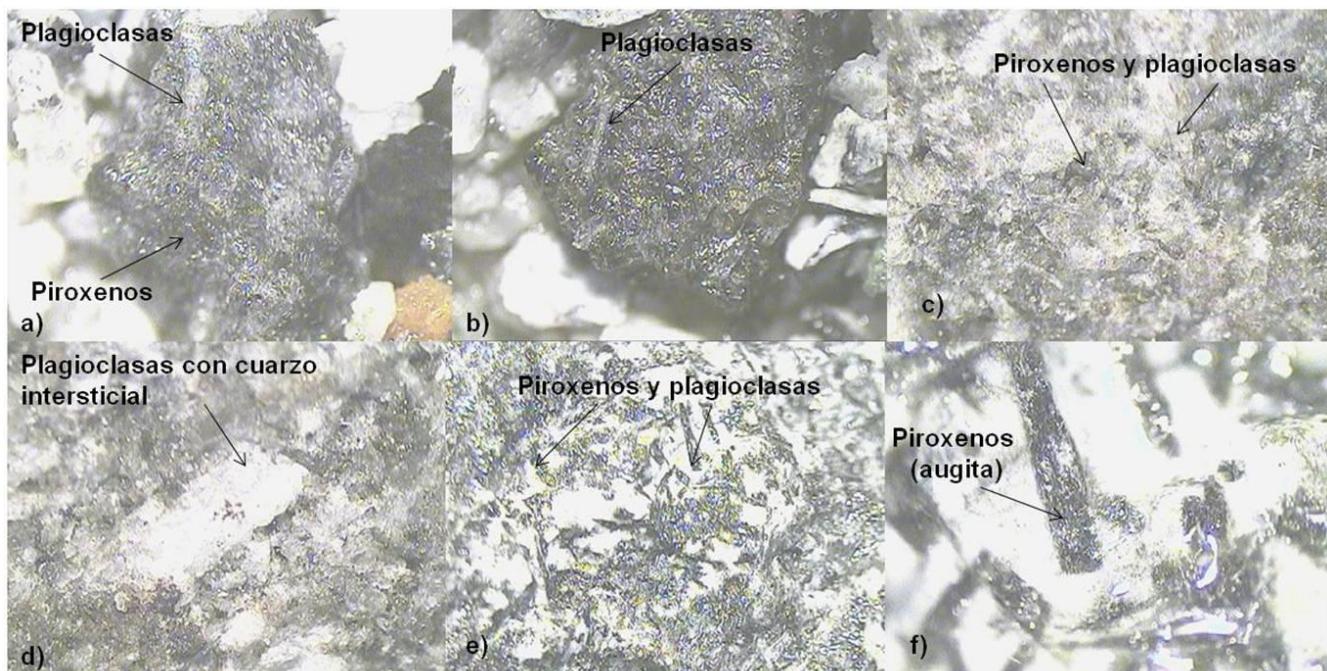


Fig. 4. Ocurrencia de FRI (intrusiva) ambiente hipabísal, con fenocristales de plagioclasa. b). FRI (intrusiva) con fenocristales de plagioclasa. c) piroxenos (augita) con plagioclases cárnicas. d) plagioclases con cuarzo intersticial. e y f) abundancia de piroxenos (augita) + plagioclases + feldespatos alcalinos y cuarzo.

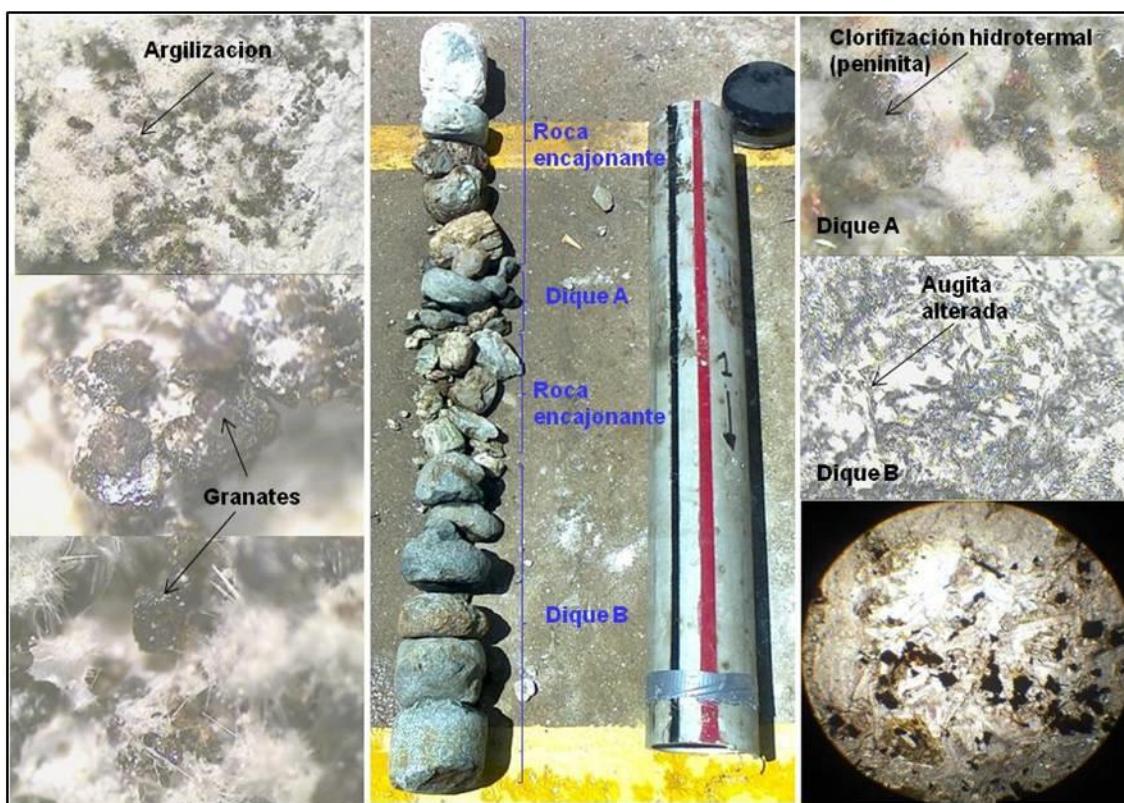


Fig. 5. Núcleo recuperado en el pozo 528D. Compuesto por arenisca y lutita silicificada (roca encajonante) con argilización acicular y presencia de granates (grosularita), cortadas por un dique de 5 cm (dique A) y un dique de 40 cm (dique B).

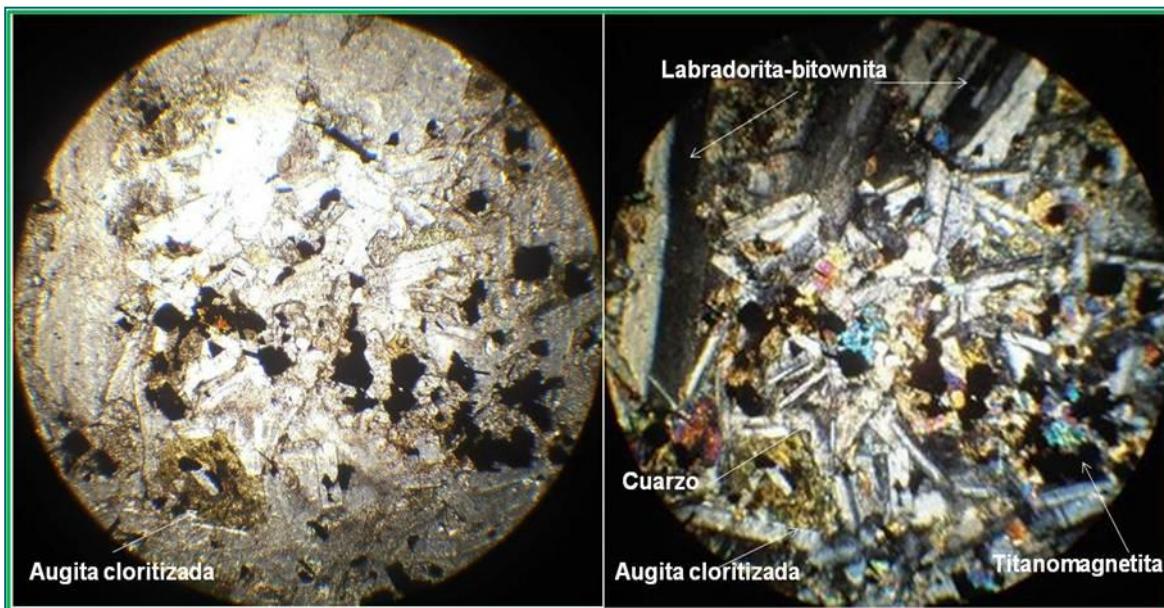


Figura-6. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico con luz polarizada y nícoles cruzados, observando la siguiente descripción de la muestra (Diabasa de augita)

Plagioclasas (labradorita-bitownita= 50%, Piroxenos (augita titanifera)=35%, Ilmenita=15%. Minerales Secundarios: Cuarzo y Clorita (peninita) como de alteración



Figura-7. Núcleo recuperado en el pozo 529D a 3483 m de profundidad.

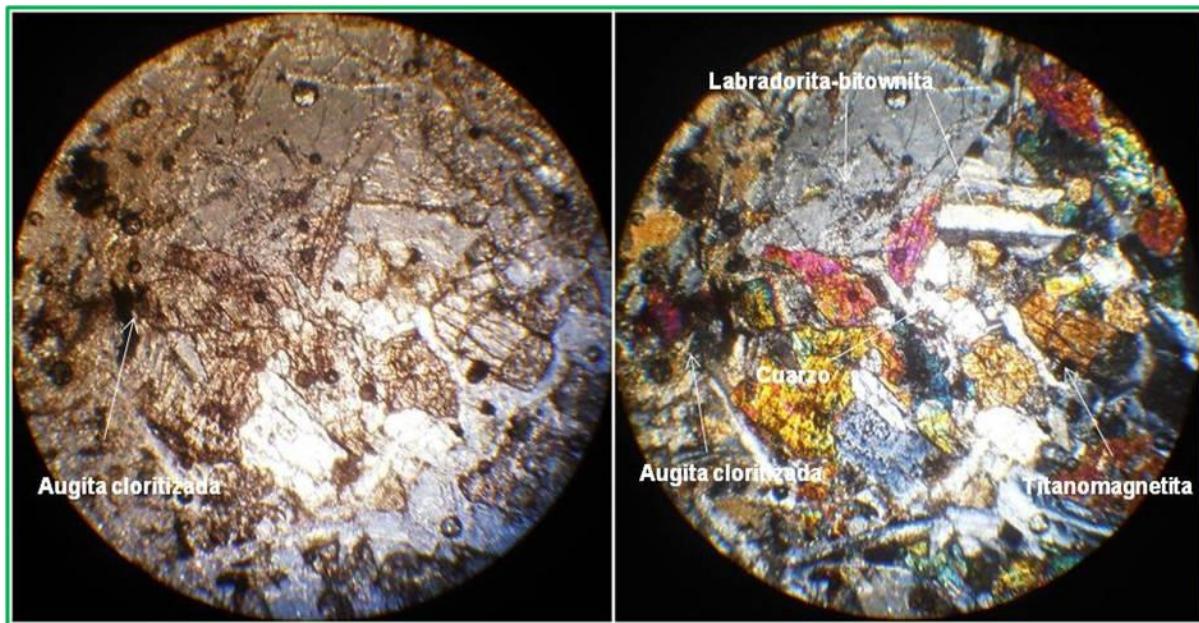


Figura-8. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico con luz polarizada y nícoles cruzados, observando la siguiente descripción de la muestra (Diabasa de augita)

Plagioclásas (labradorita-bitownita= 45%, Piroxenos (augita titanifera)=45%, Ilmenita=10% y Minerales Secundarios: Cuarzo y Clorita (peninita) como de alteración, se observan microfracturas syngenéticas.

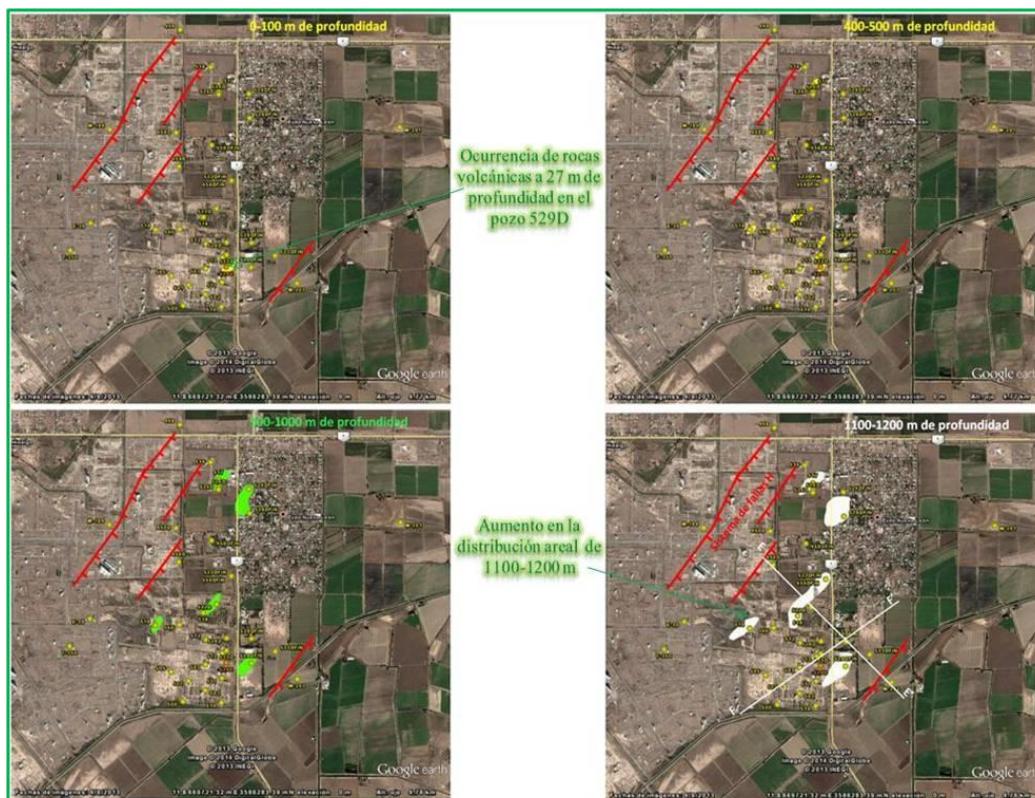
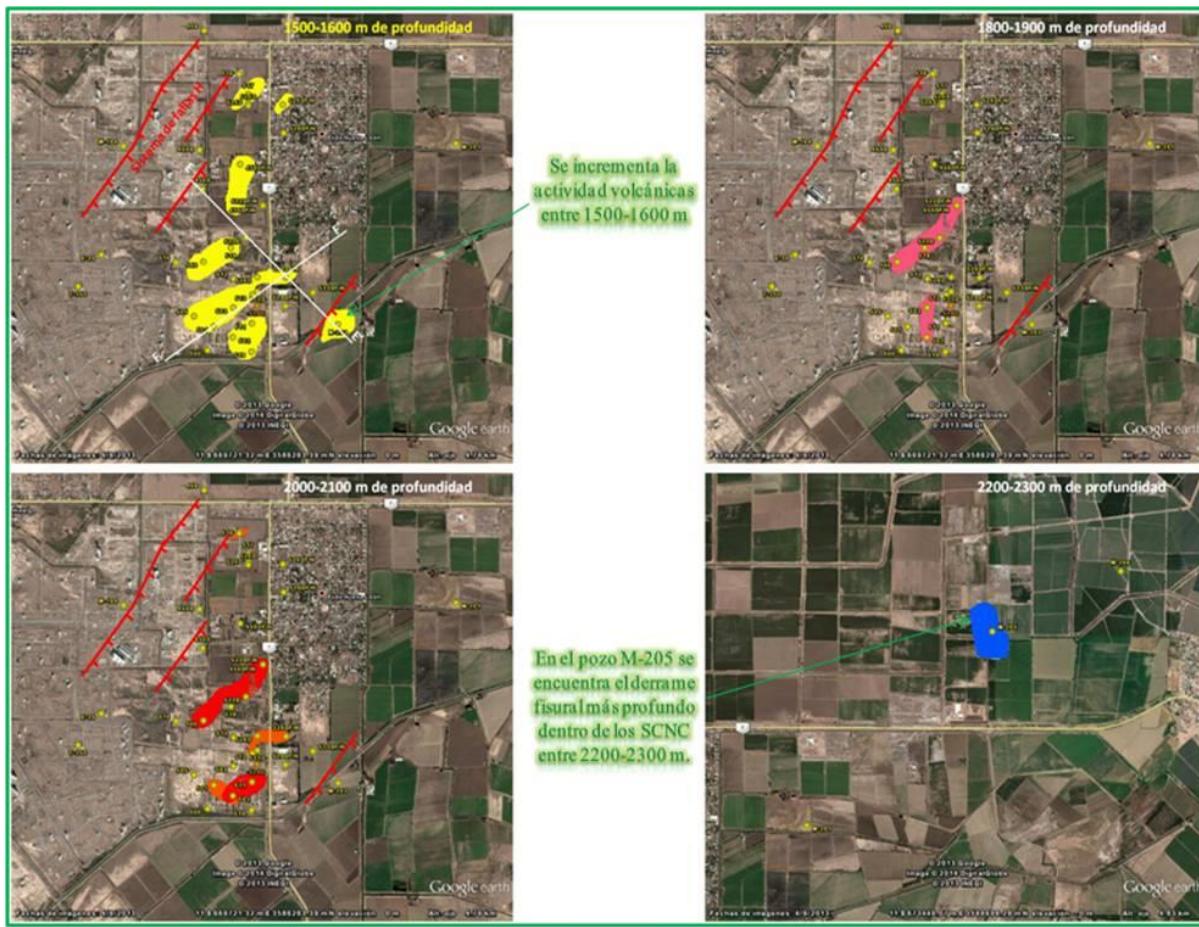
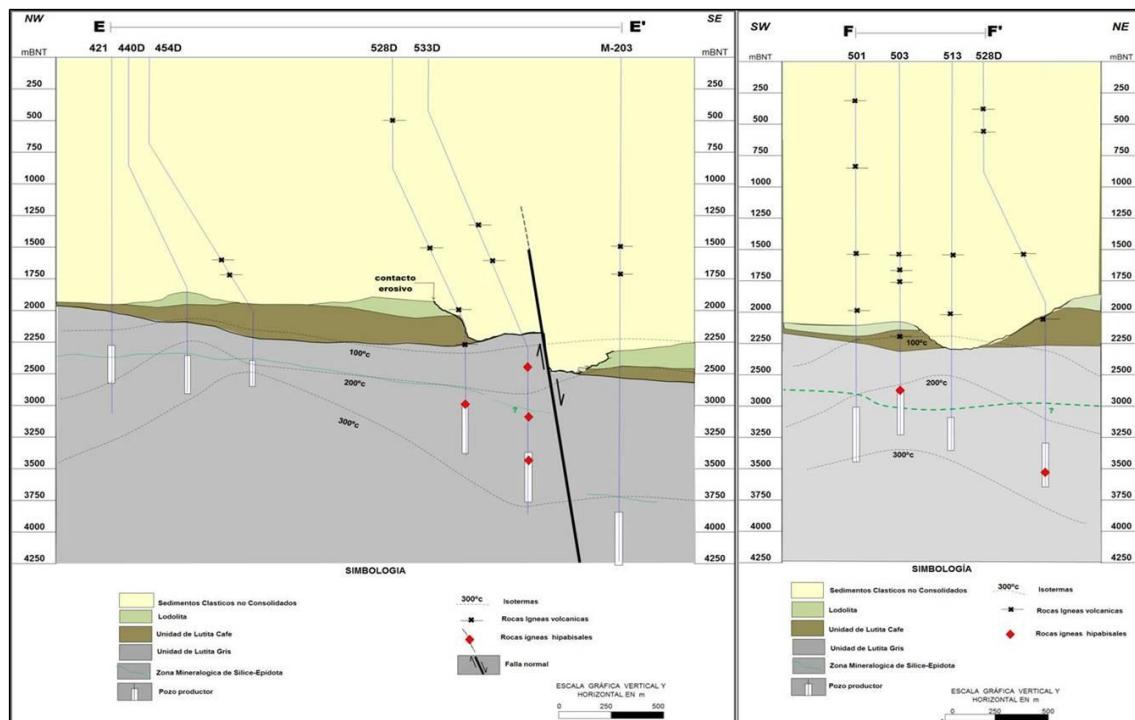


Figura-9. Imágenes con la presencia de rocas ígneas volcánicas entre los intervalos: 0-100, 400-500, 900-1000 y 1100-1200 m



**Figura-10.** Imágenes con la presencia de rocas ígneas volcánicas entre los intervalos: 1500-1600, 1800-1900-2000-2100 y 2200-2300 m



**Figura-11.** Secciones estructurales E-E' y F-F', donde se observa la ocurrencia de rocas ígneas en los pozos geotérmicos.

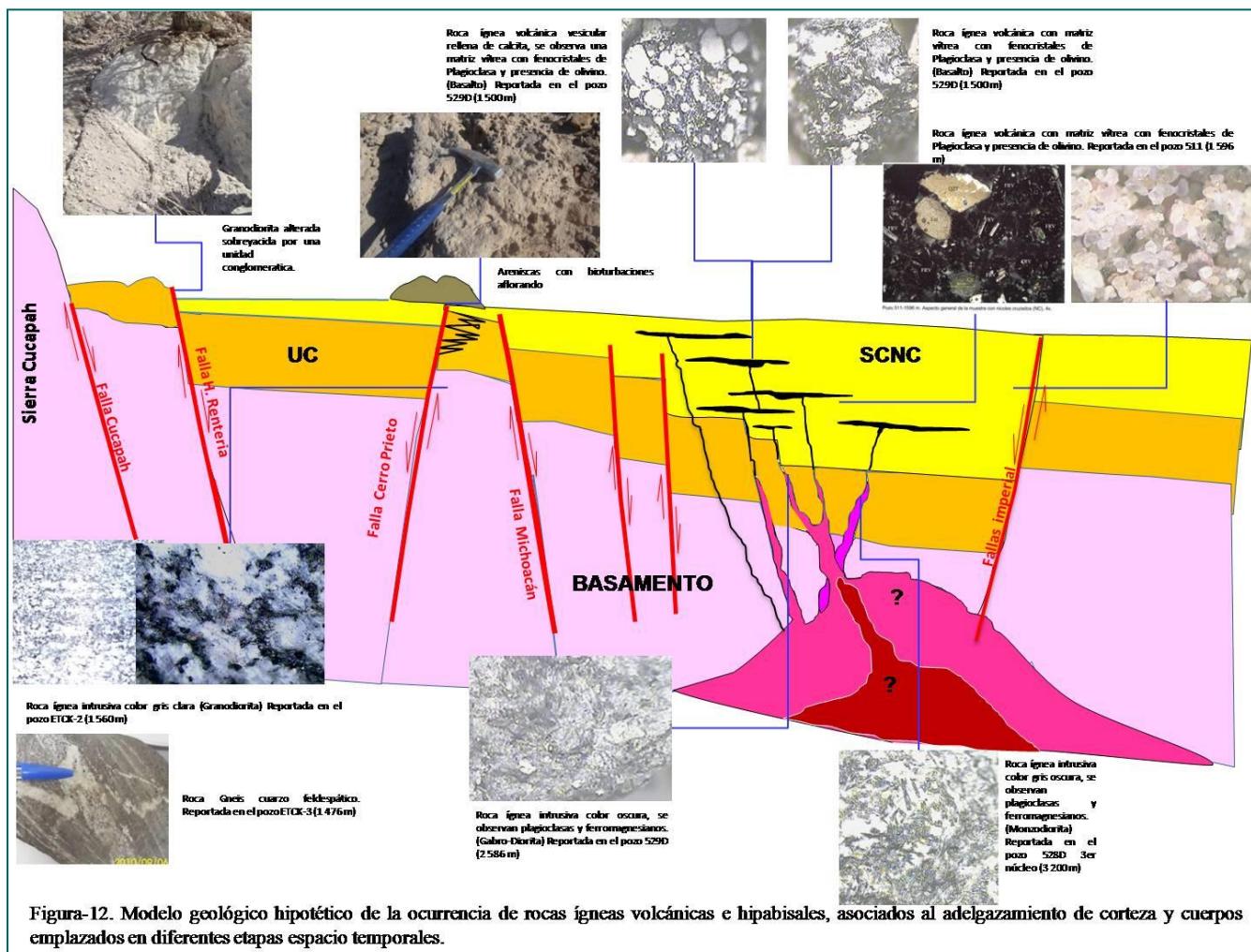


Figura-12. Modelo geológico hipotético de la ocurrencia de rocas ígneas volcánicas e hipabiscales, asociados al adelgazamiento de corteza y cuerpos emplazados en diferentes etapas espacio temporales.