

Mineralogía de la zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE) del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México

*Georgina Izquierdo¹, Alfonso Aragón¹, Enrique Portugal¹, Víctor M. Arellano¹,
Jesús de León² y Julio Álvarez²*

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Av. Reforma 113, Palmira, Cuernavaca, Mor. 62490 México. ²Comisión Federal de Electricidad, Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26.5, B.C. México. Correo: gim@ie.org.mx

Resumen

Se determinó la distribución de minerales hidrotermales y las asociaciones paragenéticas y se realizó el estudio microtermométrico de inclusiones fluidas a partir de recortes de perforación de pozos de las distintas áreas del campo geotérmico de Cerro Prieto. Las muestras de recortes y núcleos de perforación estudiados provienen de la zona de producción a la que se le ha denominado Zona Mineralizada de Sílice-Epidota (ZMSE), que se encuentra en la parte profunda de la lutita gris con importantes horizontes de areniscas. En esta zona las asociaciones paragenéticas más comunes han mostrado tres intervalos de temperatura para la ZMSE: <200° C, 200-250° C, 250-300° C. El primer intervalo está caracterizado principalmente por arcillas, calcita y cuarzo; el segundo por cuarzo, epidota, clorita y micas, y el tercero por epidota, anfíboles, illita y clorita. El estudio de inclusiones fluidas en fragmentos de cuarzo autigénico mostró la presencia de inclusiones de dos fases (líquido + vapor) con puntos de fusión de hielo altos y bajos que corresponden a baja y alta salinidad del fluido. Las temperaturas de homogeneización (Th) para algunos pozos muestran buena concordancia con los registros de temperatura determinados a distintos tiempos de reposo.

Palabras clave: Campo geotérmico de Cerro Prieto, mineralogía hidrotermal, inclusiones fluidas.

Mineralogy of the silica-epidote mineralized zone (SEMZ) in the Cerro Prieto geothermal reservoir, B.C., Mexico

Abstract

The distribution of hydrothermal minerals, mineral assemblages and fluid inclusion data were taken from drill cuttings from the production zone of wells all over the Cerro Prieto geothermal field. The production zone has been termed the silica-epidote mineralized zone (SEMZ), and is located in the deep part of the gray shale where thick layers of sandstone are found. Common mineral assemblages show three temperature ranges in the SEMZ: <200° C, 200-250° C and 250-300° C. The first range is characterized by clays, calcite and quartz; the second by quartz, epidote, chlorite and mica, and the third by epidote, amphibole, illite and chlorite. The study of fluid inclusions in authigenic grain quartz has shown two-phase fluid inclusions (liquid + vapor) of different salinities. A wide range exists of homogenization temperatures (Th) and for some wells there is a good agreement between Th and direct temperature measurements.

Keywords: Cerro Prieto geothermal field, hydrothermal mineralogy, fluid-inclusions.

1. Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) es un campo de líquido dominante, localizado en la parte noroeste de México cerca de la frontera con Estados Unidos (Fig. 1). Se encuentra en areniscas y lutitas del delta del Río Colorado. Es el campo productor más importante de la República Mexicana con 720 MW de capacidad eléctrica instalada. El campo alberga más de 200 pozos cuyas profundidades se encuentran entre 1250 y 3550 m; de ellos aproximadamente 160 son productores y 7 son inyectoros.

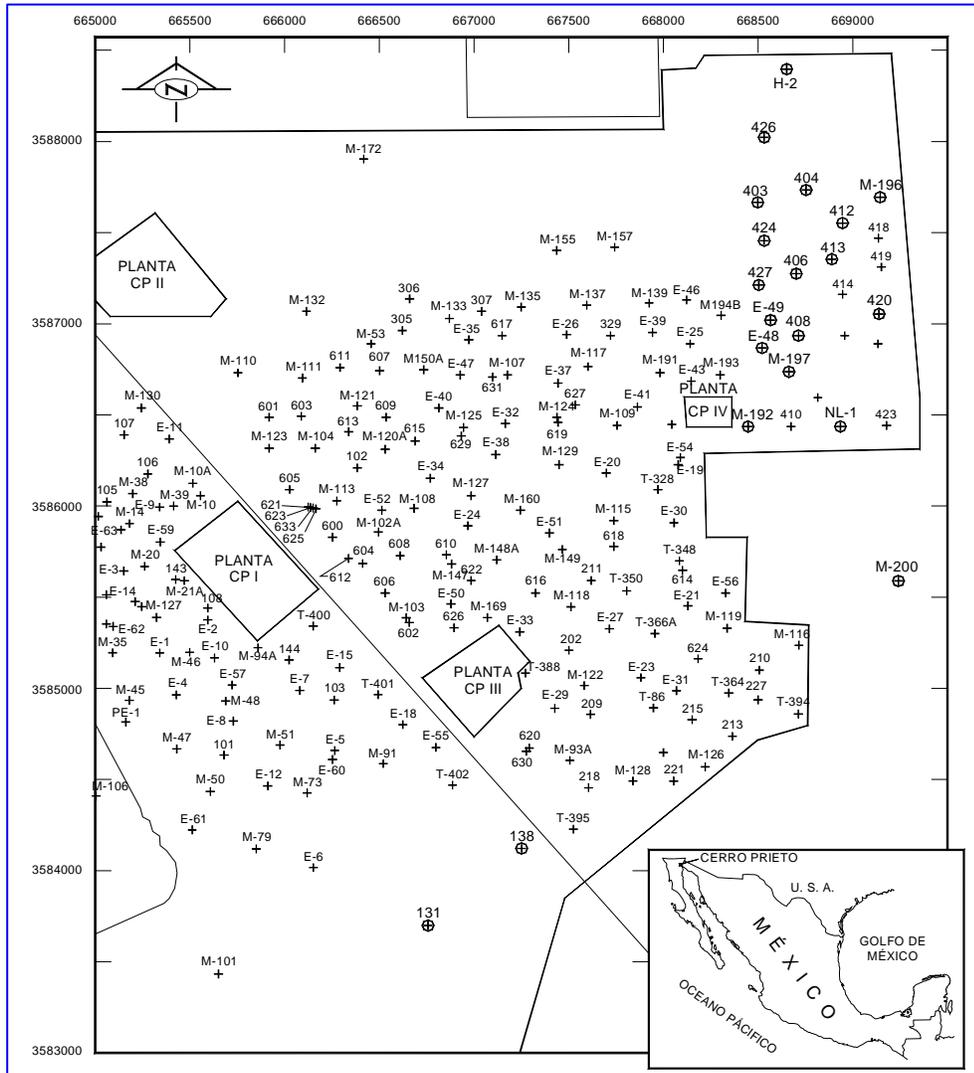


Fig. 1. Localización de pozos en el CGCP. El recuadro muestra la localización del campo dentro de la República Mexicana

Para facilitar la administración del campo, este se ha dividido en cuatro áreas conocidas como Cerro Prieto I (CP I), al oeste de la vía del tren; Cerro Prieto II (CP II) al sureste; Cerro Prieto III (CP III) en la parte noreste y Cerro Prieto IV (CP IV) al noreste de CP III.

De acuerdo con la localización de las áreas y la profundidad de producción, se ha inferido la existencia en el subsuelo de dos yacimientos en lutitas con intercalaciones de areniscas, que se alimentan de fluidos a través de fracturas (Lippmann *et al.*, 1991). El llamado yacimiento alfa está localizado en la parte oeste del campo. Es el más somero, fue el primero en explotarse y su profundidad media varía entre 1000 y 1500 m (CP I). El yacimiento beta, más profundo, se extiende debajo de toda el área que ocupa el campo (cerca de 15 km²), entre 1500 y 2700 m de profundidad, con temperaturas más altas que en el yacimiento alfa.

El yacimiento beta está localizado en areniscas permeables y de alta porosidad que subyacen a la unidad conocida como lutita café, de baja porosidad y relativamente impermeable.

En la actualidad Cerro Prieto es el campo geotérmico más desarrollado de México país y uno de los más estudiados del mundo. El conocimiento sobre su comportamiento es resultado de una enorme cantidad de estudios continuos realizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y por investigadores de otras instituciones.

Desde el punto de vista mineralógico, el estudio de minerales de alteración como indicadores de condiciones físicas y químicas en Cerro Prieto ha recibido poca atención. Los trabajos realizados por Elders *et al.*, (1979, 1981) han sido tomados como referencia en la mayoría de las publicaciones y la representación gráfica de los minerales se ha usado como modelo en otros campos para indicar la mineralogía hidrotermal en función de la temperatura.

Izquierdo *et al.*, (2000, 2001) realizaron el análisis petrográfico y de difracción de rayos X de material de la ZMSE de pozos localizados en el área de CP IV. La alteración de las rocas con respecto a la mineralogía primaria es de 40% aproximadamente. La alteración es considerada de alto rango y moderada intensidad. Las rocas son terrígenas siendo las lutitas más abundantes que las areniscas.

Los minerales identificados por difracción de rayos X en la fracción arcillosa en pozos de CP IV son: Na-esmectita, Ca-esmectita, illita, clorita y escasos minerales interestratificados. Minerales como cuarzo, plagioclasas y anfíboles también fueron identificados. Al microscopio se identificó calcita, cuarzo, epidota, illita, clorita, esmectitas, wairakita, pirita, anfíboles y escasa pirita. Estos minerales ocurren en sistemas hidrotermales activos donde fluidos sódico clorurados de pH neutro a alcalino interactúan con las rocas del yacimiento.

Dado el tamaño de los fragmentos conteniendo minerales secundarios, en el pasado casi no había sido posible llevar a cabo estudios microtermométricos de inclusiones fluidas. El estudio que se presenta a continuación ha proporcionado información acerca de la temperatura y la salinidad de los fluidos que circularon en la zona de producción (ZMSE) antes de la explotación del campo.

El propósito de este trabajo ha sido estudiar en detalle la mineralogía hidrotermal de la ZMSE, establecer asociaciones mineralógicas, proponer su posible temperatura de formación y realizar el estudio microtermométrico de inclusiones fluidas. Las muestras estudiadas provienen de la ZMSE de pozos incluidos en las secciones geológicas propuestas por la Residencia General de Cerro Prieto (ver Figura 2).

2. Marco geológico

Tectónicamente la depresión del Salto del área del Golfo de California es una zona de transición entre la zona de divergencia de la Trinchera del Pacífico Este y el sistema transformante de la Falla de San Andrés. El depósito de sedimentos deltaicos y abanicos aluviales en el basamento granítico del área de Cerro Prieto se inició durante el Terciario. A partir de datos petrográficos de más de 300 pozos se han identificado cinco unidades litológicas (Lira, 2005), que son de la más antigua a la más reciente:

Un basamento representado por rocas graníticas y metamórficas y por un intrusivo de composición basáltica que se localiza a profundidad. Esta unidad está representada en la superficie por rocas que conforman la Sierra de los Cucapá.

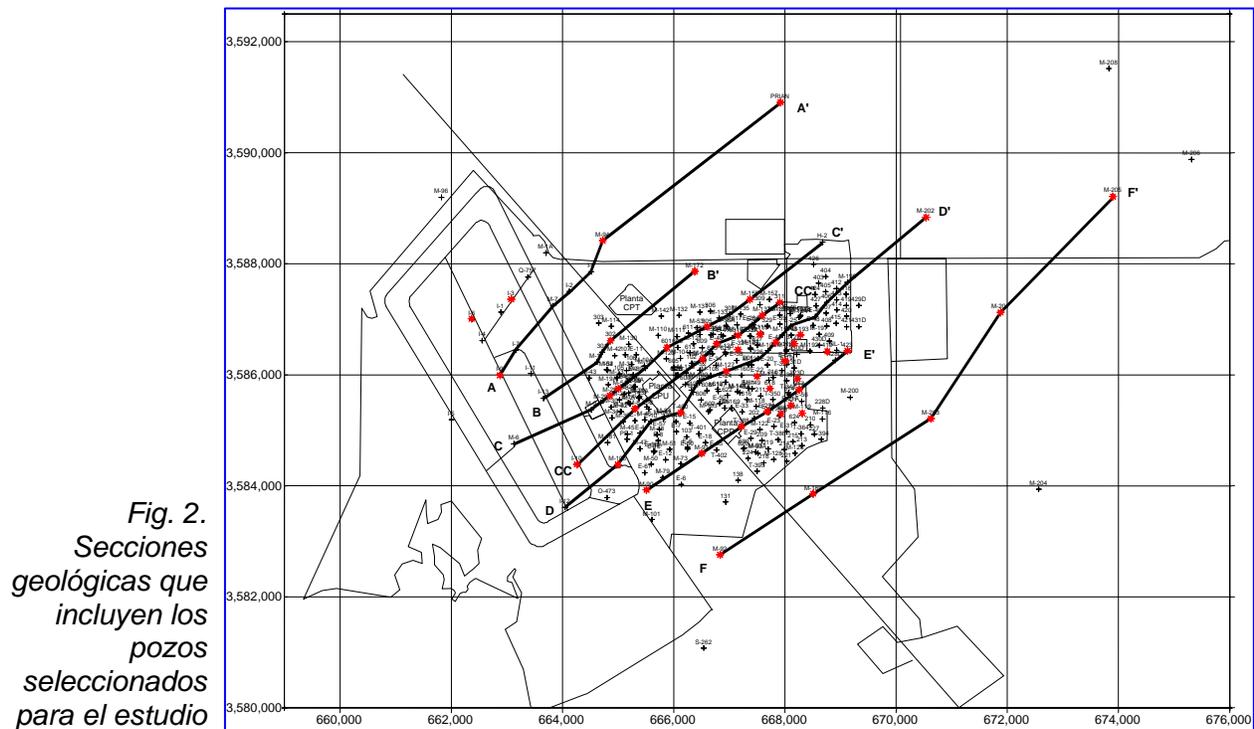


Fig. 2.
Secciones
geológicas que
incluyen los
pozos
seleccionados
para el estudio

La lutita gris, que sobreyace al basamento, es la segunda unidad, formada por lutitas y areniscas interestratificadas en distintas proporciones. Juntas tienen un espesor promedio de 3000 m. Al oeste del campo la cima de esta unidad está a casi 400 m de profundidad; al este, en el pozo M-201, está a 2847 m. El espesor de la arenisca en la lutita gris varía de unos cuantos metros a 300 m. Las areniscas de esta unidad presentan su cementante original típicamente reemplazado por minerales hidrotermales, constituyendo así la llamada zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE). Esas areniscas alteradas son las que alojan a los fluidos geotérmicos, por lo que la ZMSE ha sido considerada como la zona productora del yacimiento. En esta unidad el flujo de los fluidos en el subsuelo ha sido descrito por Halfman *et al.* (1984) y por Lippmann *et al.* (1991), siendo en dirección general este-oeste, o más específicamente de la región este-sureste hacia la porción occidental, donde los fluidos descargan en lo que actualmente es la laguna de evaporación solar. Según Halfman y otros, el fluido asciende de zonas profundas a través de una falla importante (conocida como falla H), alcanzando la ZMSE. Una porción del fluido caliente se distribuye en las capas permeables siguiendo trayectorias horizontales. Ascensos verticales de fluido fueron identificados en el entorno del pozo M10A, lo cual ocurre por la ausencia o escasez de lutitas.

A la tercera unidad, depositada sobre la lutita gris, se le conoce como lutita café. Está compuesta de lutita, lodolitas y horizontes lenticulares de arenisca. La cima de esta unidad se localiza en el oeste a 600 m de profundidad y a 2500 m en el oriente (pozo M-205).

La cuarta unidad es una lodolita. Sobreyace irregularmente a la lutita café y a veces directamente a la lutita gris, con una distribución errática y presenta intercalaciones de arenas y gravas. Se localiza principalmente al este del campo.

La quinta unidad está conformada por sedimentos clásticos no consolidados compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas. Su espesor es variable, angostándose al oeste y ampliándose hacia el este. Esta unidad hospeda a un acuífero regional somero de agua dulce que se vuelve progresivamente salina en las cercanías del campo.

3. Parte Experimental

El estudio petrográfico se llevó a cabo en láminas delgadas de los recortes de perforación de cada uno de los pozos seleccionados.

El análisis mineralógico de la fracción arcillosa se realizó en láminas orientadas en un difractómetro de polvos Siemens D500 con radiación filtrada de cobre.

Las determinaciones microtermométricas se realizaron en una platina de calentamiento-enfriamiento Linkam THMSG600. La platina se calibró con patrones certificados (*synthetic fluid-inclusions samples*).

Ya que las inclusiones fluidas en las muestras del campo de Cerro Prieto son acuosas, sólo se determinaron dos parámetros: la temperatura de fusión del hielo (T_f), la cual se convierte en salinidad expresada como porcentaje en peso equivalente de NaCl, y la temperatura de homogeneización (T_h), la cual se considera como la temperatura mínima a la cual quedó atrapada la inclusión y es, por tanto, un buen indicador de la temperatura de formación del mineral en el que se encuentra la inclusión.

4. Interpretación

Se llevaron a cabo los análisis petrográficos y de difracción de rayos X en muestras profundas de la zona de producción de pozos localizados en las cuatro áreas del campo de Cerro Prieto. Dependiendo de la localización de los pozos y de la disponibilidad del material, las muestras se analizaron cada 200 o 250 m de profundidad pero siempre dentro de la ZMSE. Como una aproximación, se ha asignado una temperatura correspondiente a asociaciones mineralógicas semejantes en otros campos geotérmicos del mundo.

La epidota, como en otros campos, ha sido considerada como un buen indicador relacionado con temperatura, permeabilidad y composición del fluido (Browne, 1978; Reed, 1994; Reyes, 1990; entre otros). La presencia de epidota se ha reportado en sistemas geotérmicos activos a temperaturas < de 200° C pero es común y abundante entre los 230 y los 260° C (Bird y Spieler, 2004).

En las muestras estudiadas la intensidad de la alteración hidrotermal puede ser considerada como mediana a baja; pocas muestras presentan valores cercanos al 50% de alteración. En areniscas la alteración se presenta en el material cementante de los granos, aunque también algunos granos han sido alterados hidrotermalmente.

Al microscopio petrográfico, con luz transmitida se identificaron minerales como arcillas, minerales interestratificados, micas, clorita, calcita, cuarzo y epidota. En menor cantidad se observaron anfíboles (tremolita-actinolita, gedrita), vermiculita, anatasa y esfena. Los minerales opacos identificados fueron magnetita, hematita, pirita, calcopirita y esfalerita.

La mineralogía observada muestra asociaciones de minerales que se formaron por la interacción de la roca con fluidos calientes de pH neutro a alcalino. Aunque en la actualidad se tiene evidencia que algunos pozos, principalmente del área de CP IV, producen un fluido agresivo probablemente de naturaleza ácida, no se encontró evidencia de minerales formados en medio ácido. Tampoco se encontraron minerales como wairakita y prehnita, reportados en los trabajos de Elders *et al.* (1979, 1981).

Algunas de las asociaciones mineralógicas encontradas en la ZMSE y su correspondiente temperatura de equilibrio se mencionan a continuación:

Ep – Cl – Ca – Op	> 220° C
Ep – Cl – Ca – Sph	> 220° C
Ep – Cl – Anf	250 > 300° C
Ep – Qtz – Cl – Anf	250 > 300° C
Qtz – Ca – Cl – He	150 – 200° C
Qtz – Ca – Ep – Op	> 200° C
Qtz – Ep – Anf	> 300° C
Cl – Op	~ 150° C
Cl – Ca – Ep – Qtz – Op – Sph	200 – 250° C
Cl – Ill – Ca – Sph – Ep	200 – 250° C
Cl – Ep – Anf – Qtz – Ca – Es	250 – 300° C
Ca – Cl – Qtz	< 200° C
Ca – Sph – Op – Ep	> 200° C
Ca – Cl – Ep – Sph – Op – Anf	250 – 300° C

Donde: Ep = Epidota, Cl = Clorita, Ca = Calcita, Op = Opacos, Sph = Esfalerita, Anf = Anfíbolas, Qtz = Cuarzo, He = Hematita, Ill = Illita.

Dentro de la ZMSE y de acuerdo con la mineralogía hidrotermal se pueden inferir tres zonas termal, que dependen de la proporción de lutitas y areniscas, es decir que la permeabilidad y la temperatura del estrato son factores que influyen en la interacción agua roca y por tanto en la formación de ciertas asociaciones minerales. Estas zonas son: < 200° C, 200-250° C, 250-300° C. Pocos especímenes mostraron la presencia de anfíbolas, las cuales indicarían una temperatura superior a 300° C.

La primera zona termal, de temperatura menor a 200° C, para algunos pozos corresponde a una litología dominada por limolitas y lutitas cuya permeabilidad es baja y que podría considerarse como la frontera o el contacto con la ZMSE. La ZMSE parece ser una zona confinada donde circula el fluido hidrotermal alterando en mayor grado la arenisca.

Como ya se mencionó, las asociaciones de baja y de alta temperatura dependen de la composición del estrato estudiado y de su permeabilidad; se ha observado que algunos minerales hidrotermales de alta o baja temperatura pueden ser preservados en zonas relativamente impermeables (lutitas y lodolitas). En algunos pozos, como el M-105 a 996 m de profundidad, la muestra ha sido clasificada como lodolita-lutita (en un 65%) y arenisca (en un 35%). La asociación mineralógica a esta profundidad indica una temperatura menor a 200° C. A 1248 m de profundidad la muestra clasificada como arenisca (en un 98%) muestra la presencia incipiente de epidota, lo que sugiere que la temperatura podría ser mayor a 230° C. Finalmente, a 1587 m de profundidad la muestra corresponde a una lutita (en un 93%) y nuevamente la asociación mineralógica indica una temperatura < 200° C.

En la Figura 3 se representa la mineralogía hidrotermal de todo el campo. La wairakita es un mineral común en las rocas de pozos del área de CP IV, pero no en otras áreas del campo. La vermiculita es otro mineral poco abundante que se encontró en muestras profundas de la parte oeste del campo, pero no en la parte este.

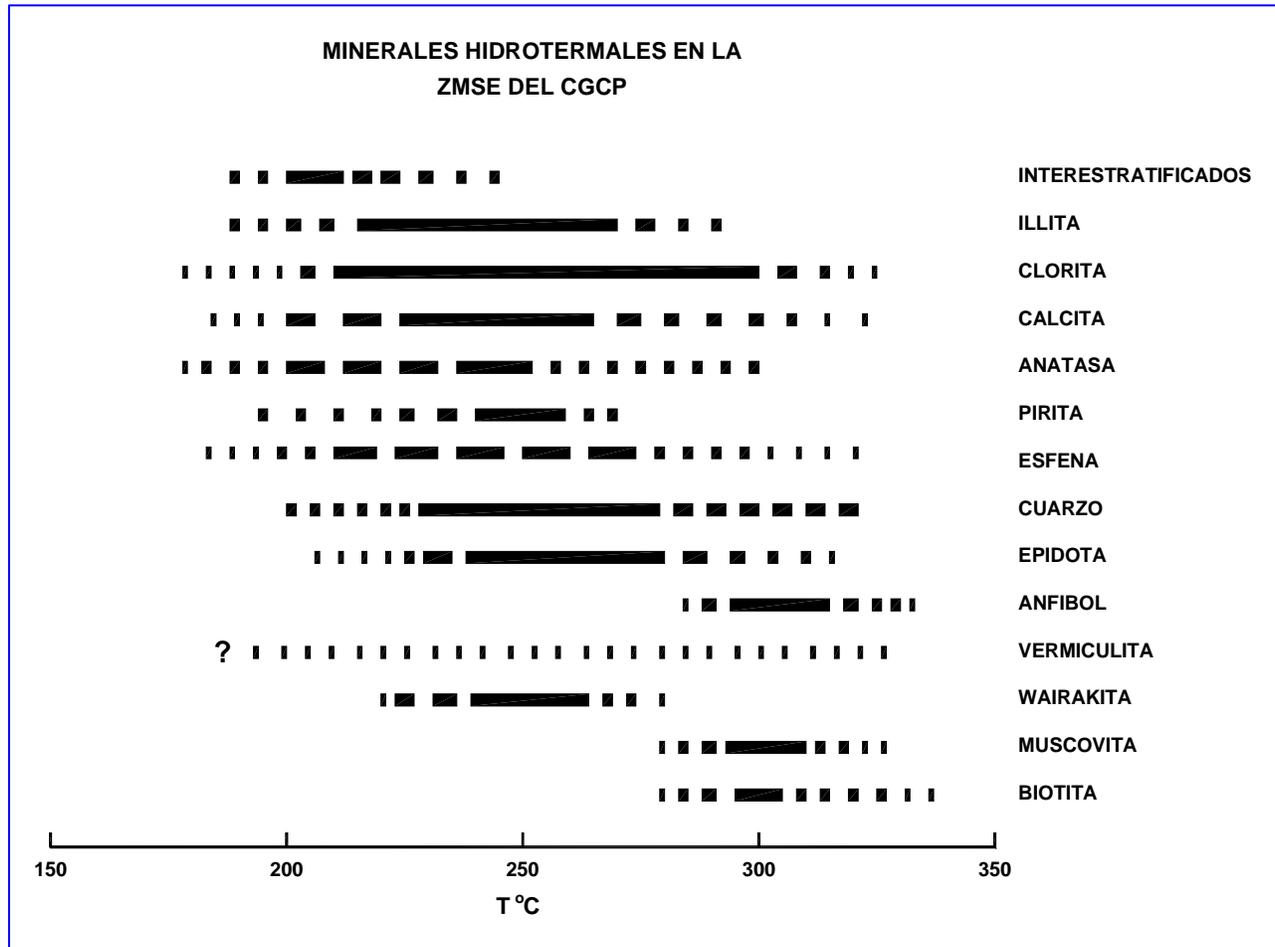


Fig. 3. Mineralogía de la ZMSE en el campo geotérmico de Cerro Prieto en función de la temperatura

El resultado de este estudio se representó en varias secciones geológicas en dirección NE-SW; cada sección incluye al menos siete pozos con la mineralogía de la ZMSE. La Figura 4 muestra una de estas secciones con la litología y la distribución de minerales hidrotermales de la ZMSE. La epidota está representada con un rombo, cuyo tamaño representa el porcentaje relativo de abundancia. En todas las secciones geológicas del campo la presencia de epidota indica interacción de la roca con fluidos calientes así como el perfil del horizonte permeable en la arenisca incluida en la lutita gris, destacando la zona permeable de la menos permeable. El mismo comportamiento de la epidota se observa en otras secciones del campo, presentándose otro ejemplo en la Figura 5.

Una mayor proporción de anfíbol a profundidad, por ejemplo en el pozo E22A, indica una temperatura superior a 300° C. La temperatura de homogeneización para este pozo entre los 2400 y los 2667 m de profundidad, está en el intervalo entre 302 y 336° C.

El estudio microtermométrico de inclusiones fluidas se llevó a cabo en cuarzo secundario, reemplazando al cementante de las areniscas o bien en pequeños cristales ocupando huecos en la matriz de estas rocas.

Las inclusiones fluidas analizadas son del tipo vapor + líquido con baja proporción de vapor. Las temperaturas de fusión del hielo indican fluidos con diferente salinidad. Todas las inclusiones estudiadas homogeneizaron a la fase líquida. Ya que las inclusiones analizadas vienen de la zona de producción (ZMSE), las temperaturas de homogeneización (T_h) resultaron elevadas ($> 250^\circ \text{C}$), excepto aquellas que provienen de pozos localizados en los márgenes del campo, como en el caso de los pozos I-3 y M-92.

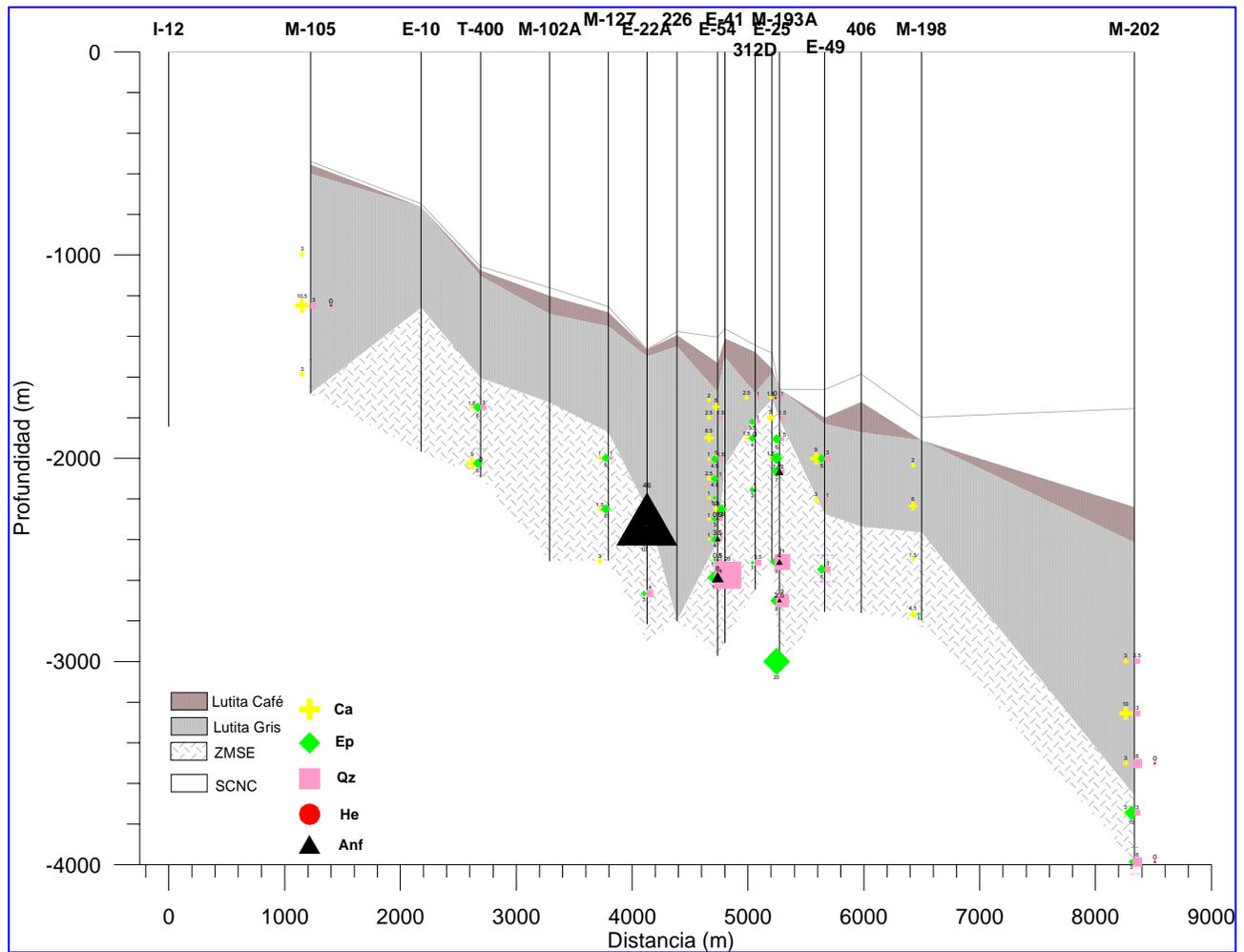


Fig. 4. Sección transversal NE-SW mostrando la ubicación de pozos, la litología y la distribución de minerales en la ZMSE.

La Tabla 1 contiene una selección de datos microtermométricos de muestras de pozos alineados en una sección transversal con dirección NE-SW. Se puede observar que, en el pozo E-49, para una misma profundidad la T_h es constante y la salinidad es variable; en otros pozos se observa lo opuesto, es decir una T_h variable y una salinidad constante. Esto podría indicar varios procesos en los que circularon fluidos de

Pozo	Prof. (m)	T_h °C	T_{fh} °C	% en P eq NaCl
I-3	1206.3	170	-1	1.16
M-202	3986	326	-0.4	0.66
M-198	2496	338	-0.1	0.16
M-198	2768	320	-5.7	8.78
E-49	2547	321	-5.3	8.24
E-49	2547	320	-9.0	0.82
T-400	2025	300	-0.1	0.17
M-105	1587	327	-3.7	6.08

Tabla 1. Datos microtermométricos de inclusiones fluidas en cristales de cuarzo de muestras profundas de pozos del campo de Cerro Prieto.

distintas características, pero para confirmarlo es necesario realizar el estudio microtermométrico de un mayor número de pozos.

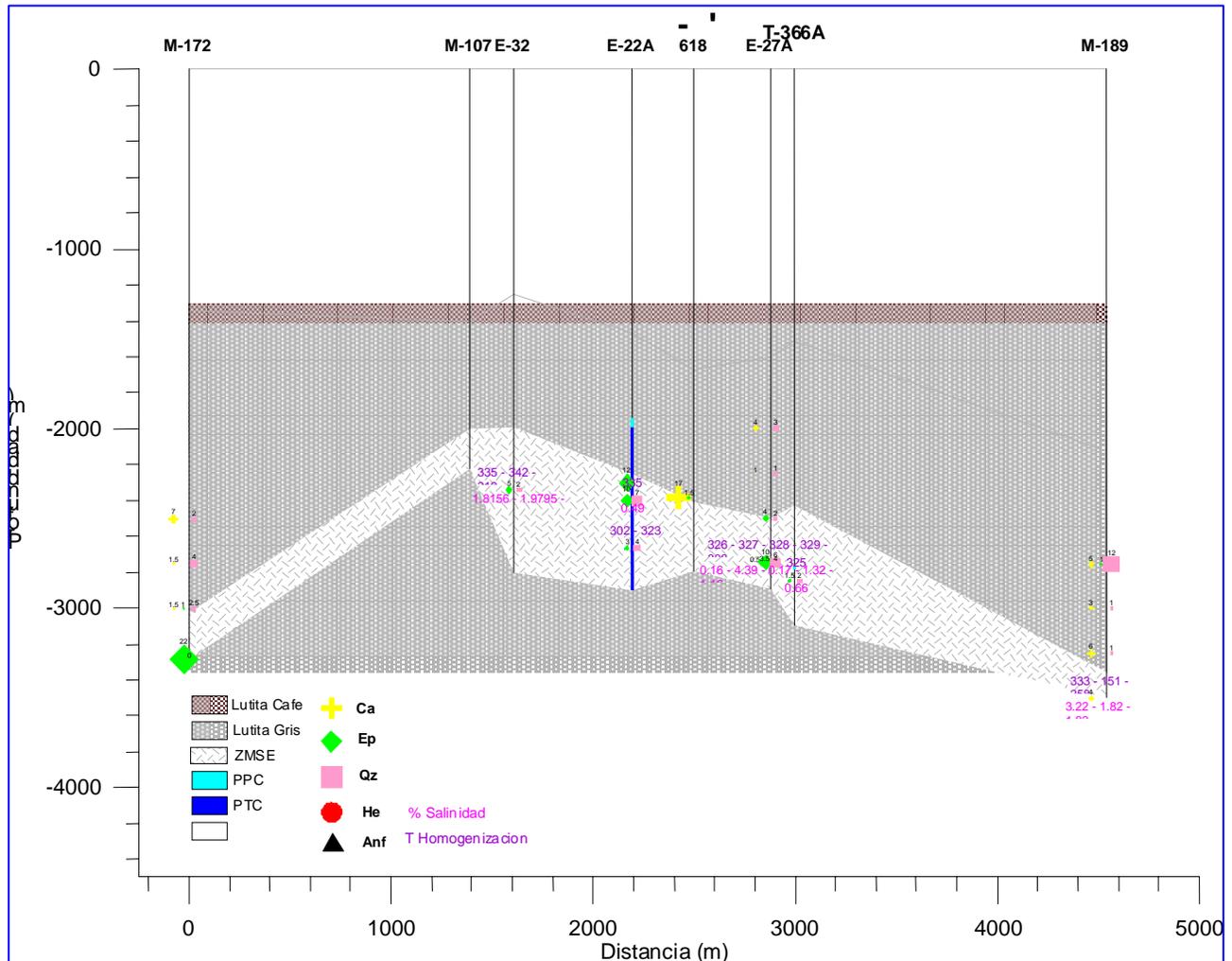


Fig. 5. Otra sección transversal NE-SW que incluye la litología, la mineralogía hidrotermal y datos microtermométricos para la ZMSE.

Para algunos pozos se encontró una buena concordancia con datos provenientes de registros de temperatura medidos a distintos tiempos de reposo (información proporcionada por la Residencia de Estudios de Cerro Prieto), por ejemplo para los pozos T-400, M-198 y M-105. En el primero la T_h obtenida en una inclusión proveniente de los 2025 m de profundidad resultó de 300°C , y un registro corrido con diez días de reposo midió una temperatura de 318°C a una profundidad de 2043 m. En el pozo M-198 la T_h obtenida en una inclusión a 2768 m de profundidad fue de 320°C , y de acuerdo con un registro de temperatura tomado con cinco días de reposo, la temperatura medida a 2700 m de profundidad fue de 327°C . La T_h para el pozo M-105 a 1587 m de profundidad fue de 327°C , mientras que a 1650 m y con ocho días de reposo el registro mostró una temperatura de 322°C .

5. Conclusiones

En el campo de Cerro Prieto el porcentaje total de alteración hidrotermal no es alto. Las muestras profundas de la ZMSE presentan menos del 50% de alteración. Sin embargo, dada la presencia de minerales como la

epidota y las anfíbolas es evidente que fluidos a temperaturas mayores de 250° C han estado en contacto con las rocas. Por lo tanto, por lo menos en algunas de las muestras estudiadas el bajo porcentaje de alteración total podría indicar un sistema hidrotermal relativamente joven.

Por analogía con otros campos geotérmicos se ha inferido la temperatura para algunas de las asociaciones mineralógicas comunes en la ZMSE. En un intervalo de profundidad relativamente corto se han reconocido tres zonas termales que dependen de la movilidad del fluido en estratos poco permeables (limolita-lutita) y en estratos con mayor permeabilidad (areniscas). Para algunos pozos la temperatura estimada no siempre es progresiva debido que las intercalaciones de areniscas en la lutita gris son muy variables.

Es claro que en Cerro Prieto la mineralogía formada depende de la temperatura y de la permeabilidad de las rocas. En la lutita gris los horizontes de espesor considerable de areniscas son el medio permeable donde la interacción fluido/roca se lleva a cabo dando lugar a la formación de minerales autigénicos. La epidota es un ejemplo de ello, y un buen indicador de temperatura. De hecho su presencia ha sido tomada como guía durante la etapa de perforación en este campo y en otros más.

Todos los minerales identificados son producto de la interacción de la roca con fluidos de pH neutro a alcalino. No se encontró evidencia mineralógica de la interacción con fluidos de pH ácido antes de que empezara la explotación del campo.

Dado el pequeño tamaño de los fragmentos de minerales autigénicos como el cuarzo, el estudio microtermométrico de inclusiones fluidas en Cerro Prieto no había sido posible anteriormente. Por tanto, los datos aquí presentados pueden ser considerados como los primeros. Sin embargo, se requiere más trabajo, pues los valores de salinidad y Th pueden dar mucha más información sobre el movimiento de fluidos antes de la explotación del yacimiento.

Para algunos pozos la temperatura de homogeneización corresponde con la temperatura deducida a partir de las asociaciones mineralógicas y con la temperatura medida en registros de pozos con distintos tiempos de reposo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a las autoridades de la Comisión Federal de Electricidad, en particular al Ing. Juan Manuel Wong Zúñiga, Residente General de Cerro Prieto, y al personal de la Residencia de Estudios por su apoyo y asistencia durante la realización de los estudios incluidos en este trabajo y que forman parte del contrato CFE 9400017183. Así mismo agradecemos al personal técnico de la Gerencia de Geotermia del Instituto de Investigaciones Eléctricas por su apoyo para efectuar el estudio.

Referencias

- Bird, Dennis K., and Abigail R. Spieler (2004). Epidote in geothermal systems. *Rev. Miner. Geochem.*, Vol. 56, pp. 235-300.
- Browne, P.R.L. (1978) Hydrothermal alteration in active geothermal systems. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, Vol. 6, pp. 229-250.

- Elders, W.A., J.R. Hoagland and S.D. McDowell (1979). Hydrothermal mineral zones in the geothermal reservoir of Cerro Prieto. *Geothermics*, Vol. 8, pp. 201-209.
- Elders, W.A., J.R. Hoagland and A.E. Williams (1981). Distribution of hydrothermal mineral zones in Cerro Prieto geothermal field of Baja California, Mexico. *Geothermics*, Vol. 10, Nos.3/4, pp. 245-253.
- Halfman, S.E., M.J. Lippmann, R. Zelwer and J.H. Howard (1984). Geologic interpretation of geothermal fluid movement in Cerro Prieto field, Baja California, Mexico. *The Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, Vol. 68, No. 1, pp. 18-30.
- Izquierdo M., G., A. Aragón, E. Portugal, I. Torres y S. Antúnez (2000). Estudio de mineralogía hidrotermal, Cerro Prieto IV. Informe IIE/11/11891 01/F preparado para CFE bajo el contrato RGCP-CLS-004/2000. Inédito.
- Izquierdo, Georgina, Enrique Portugal, Alfonso Aragón, Ignacio Torres and Julio Álvarez (2001). Hydrothermal mineralogy, isotopy and geochemistry in the area of Cerro Prieto IV, Baja California, Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 25, pp. 353-356.
- Lippmann, M.J., A. Truesdell, S.E. Halfman-Dooley and A. Mañón (1991). A review of the hydrogeologic-geochemical model for Cerro Prieto. *Geothermics*, Vol. 20, Nos. 1/2, pp. 39-52.
- Lira H., Héctor (2005). Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C. *Geotermia*, Vol. 18, No. 2, pp. 37-45.
- Reed, M.H. (1994) *Hydrothermal alteration in active continental hydrothermal systems*. Geol. Ass. Canada, Short Course Notes 11, pp. 315-337.
- Reyes, A.G. (1990) Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *J. Volcan. Geothermal Res.*, Vol. 43, pp. 279-309.