

Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC.

Héctor Lira Herrera

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto
Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26,5, Mexicali, BC, CP 21100. hector.lira@cfe.gob.mx

Resumen

Se presenta el modelo geológico conceptual actualizado del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto. La tectónica extensional que originó la Provincia de Cuencas y Cordilleras (*Basin and Range*) del oeste de Estados Unidos y noroeste de México durante el Terciario Superior, en el área de Cerro Prieto dio como resultado la formación de una cuenca de tipo medio graben, entre las fallas Cerro Prieto e Imperial (Cuenca Cerro Prieto), en la que se interpreta la existencia de fallas lístricas con dirección predominante noroeste-sureste y noreste-suroeste, que se escalonan en forma general al NE. La zona de debilidad cortical generada durante el Terciario permitió el emplazamiento de un intrusivo de composición básica dentro de la cuenca tectónica, el cual ha sido asociado con una anomalía magnética, denominada Nuevo León; este intrusivo ha sido alimentado por nuevas intrusiones magmáticas originadas por la actual tectónica extensional del Golfo de California. Las rocas más antiguas identificadas en la zona están compuestas por gneiss y esquistos de biotita de edad Pérmico-Jurásico, y tonalitas del Jurásico-Cretácico que están en contacto con granitos del Cretácico, que en conjunto representan el basamento de la región. La columna litológica en el subsuelo de la cuenca tectónica de Cerro Prieto está formada por un basamento compuesto por granitos del Cretácico; un paquete arcilloso representado por lutitas grises con intercalaciones de areniscas, lutitas cafés del Terciario y lodolitas, con un espesor promedio de 2700 m, que descansan sobre el basamento; y, finalmente, sedimentos clásticos de edad Cuaternaria producto del material depositado por el Río Colorado y los abanicos aluviales de la Sierra Cucapá, compuestos por gravas, arenas y arcillas que cubren al paquete de lutitas, alcanzando un espesor promedio de 2500 m. Los fluidos que alimentan al yacimiento geotérmico son calentados al pasar por la zona donde se localiza el intrusivo básico (fuente de calor) y migran a través de las fallas lístricas hacia estratos permeables (areniscas), que se localizan dentro del paquete de lutitas grises terciarias.

Palabras clave: Cerro Prieto, modelo geológico, litología del subsuelo.

Update of the conceptual geological model for the geothermal reservoir in Cerro Prieto, BC

Abstract

An updated, conceptual geologic model is presented for the geothermal reservoir in Cerro Prieto geothermal field. The tectonic extension that formed the Basin and Range Province of the Western United States and Northwestern Mexico during Upper Tertiary in the Cerro Prieto area resulted in the formation of a half-graben tectonic basin between the Cerro Prieto and Imperial faults. Called the Cerro Prieto basin, it includes listric faults, predominately northwest-southeast and northeast-southwest trending, stepped generally to the northeast. The zone of cortical weakness, formed during the Tertiary, allowed an intrusion of basic rock associated with the magnetic anomaly known as Nuevo Leon. The intrusive rock has been fed by new magmatic intrusions originated by the present tectonic extension of the Gulf of California. The oldest rocks identified in the area are gneiss and biotite-schists of Permian-Jurassic age and tonalites of Jurassic-Cretaceous age in contact with Cretaceous granites, all representing the regional basement. The lithologic

column in the subsurface of the Cerro Prieto basin is formed by a basement of Cretaceous granites; an argillaceous package resting on the basement composed of gray shales with interleaves of sandstone, Tertiary brown-shales and mudstones, with an average thickness of 2700 m; clastic sediments of the Quaternary age deposited mainly by the Colorado River and alluvial fans of the Cucapá Range, comprised of gravel, sands and clays with an average thickness of 2500 m, covering the shales. The fluids feeding the geothermal reservoir heat as they pass through the zone where the basic intrusive is located (the heat source) and migrate through the listric faults toward the permeable layers of sandstone located within the gray shales.

Keywords: Cerro Prieto, geological model, subsurface lithology.

1. Introducción

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), con 720 MWe de capacidad instalados, es el segundo campo más importante del mundo en la generación de electricidad, utilizando la energía calorífica localizada en el subsuelo. El CGCP se localiza dentro de la región geotérmica del Valle de Mexicali, que forma parte de la cuenca de Salton, en la porción noreste del estado de Baja California, en el límite entre el Batolito Peninsular y el sistema transcurrente de San Andrés, 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, entre los meridianos 115°12' y 115°18' longitud Oeste, y los paralelos 32°22' y 32°26' de latitud Norte (Figura 1).

Los primeros modelos conceptuales sobre el CGCP fueron presentados por Alonso y Moser en 1964 y por Mercado en 1968 (Alonso *et al.*, 1985; Puente y De la Peña, 1979), que proponen una cuenca con unidades geológicas generalizadas. Cobo (1979, 1981) y Corona (1996) presentan modelos con una descripción más a detalle de la secuencia estratigráfica que rellena la cuenca tectónica, que se caracteriza por bloques escalonados formados por fallas normales, aunque no muestran la ubicación de la fuente de calor que da origen a los fluidos hidrotermales que se encuentran en el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto.

La información obtenida con la perforación de más de 300 pozos y los estudios geológicos y geofísicos realizados desde 1958 en el CGCP, han permitido conocer las condiciones geológicas del subsuelo y tener un panorama general del comportamiento del sistema geotérmico. Sin embargo, es necesario actualizar eventualmente el modelo geológico, a fin de auxiliar en la localización y estimación de condiciones geológicas de nuevas zonas de producción y de inyección, dentro y en los alrededores del campo geotérmico. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo presentar un modelo geológico conceptual actualizado sobre el yacimiento del campo de Cerro Prieto, incluyendo la ubicación probable de la fuente de calor.

2. Marco geológico superficial

La zona geotérmica del Valle de Mexicali se localiza dentro de la cuenca de Salton, la cual abarca desde el Mar de Salton en la porción sur del estado de California, Estados Unidos, hasta el Golfo de California, y forma parte del sistema tectónico de San Andrés, formado por fallas transcurrentes con desplazamientos normales, de dirección predominante NW-SE. Las fallas más importantes reconocidas en la zona son las de Cucapá, Imperial, Cerro Prieto y Michoacán (Figuras 1 y 2).

El escalonamiento en dirección noreste de las fallas Cucapá, Cerro Prieto y Michoacán origina, junto con la falla Imperial del lado oriental, una cuenca tectónica con una profundidad aproximada de 5200 metros rellena de sedimentos aluviales y deltaicos, que abarcan edades desde el Terciario hasta el Reciente y una extensión aproximada de 25 km.

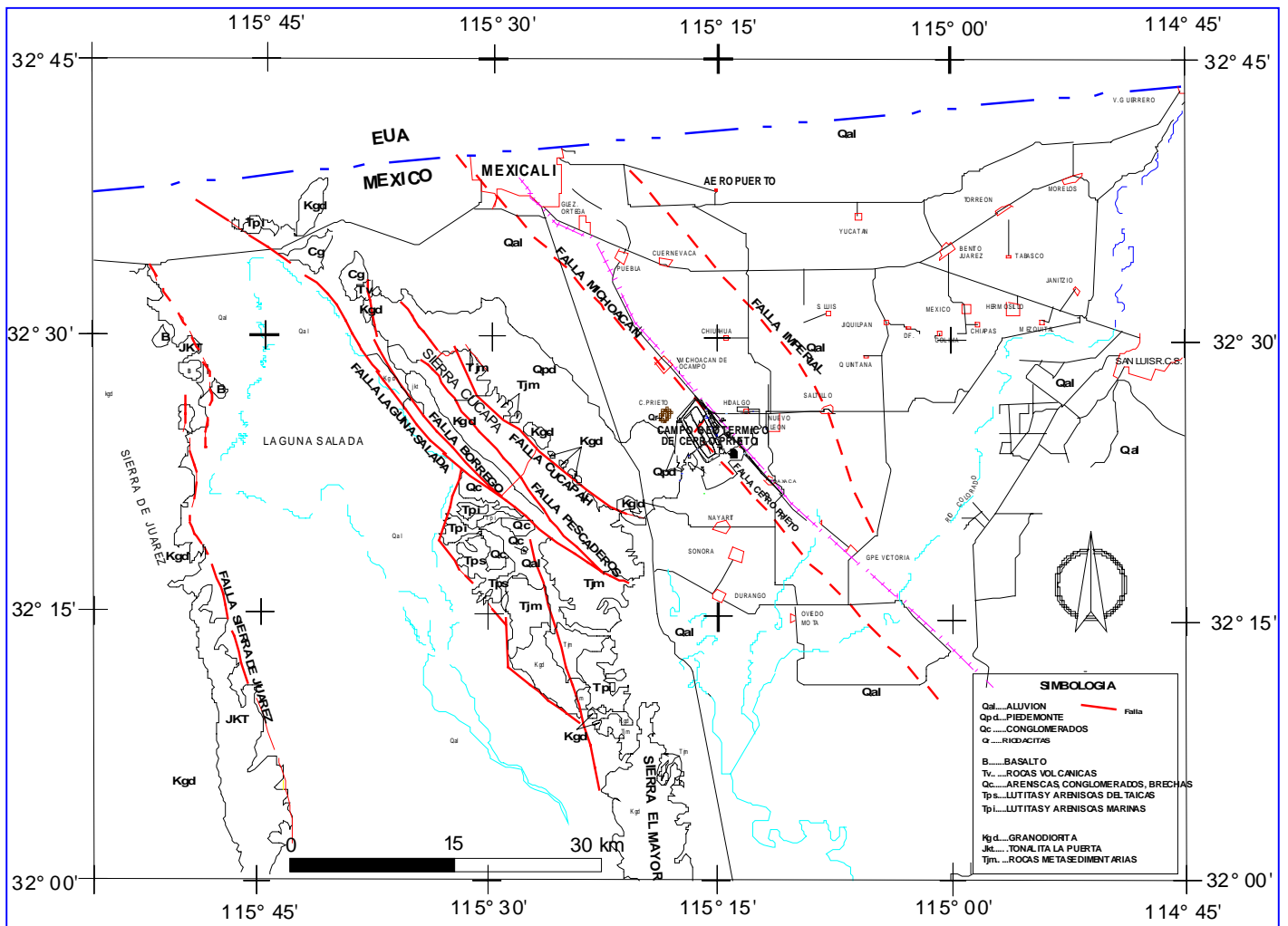


Fig. 1 Mapa geológico del Valle de Mexicali

Rocas Prebatolíticas

Afloran al oeste del CGCP en la porción noreste de las sierras de Cucapá y el Mayor (Fig. 1). Representan las rocas más antiguas de la región y están caracterizadas por metasedimentos (Tjm) de edad Pérmico-Jurásico (Siem, 1992), compuestos por gneis cuarzofeldespáticos, esquistos de cuarzo-mica, mármoles, anfibolitas y cuarcitas. Es muy probable que los metasedimentos se encuentren dentro de la cuenca tectónica, formando parte del basamento.

Rocas Batolíticas

Son rocas intrusivas que forman parte del Batolito Peninsular y están representadas por tonalitas del Jurásico-Cretácico (Jkt), que se encuentran intrusionando a las rocas metamórficas paleozoicas, y por granitos y granodioritas del Cretácico Inferior (Kgd) (Barnard, 1968; Gastil *et al.*, 1975), los cuales afloran en su mayor parte en la Sierra Cucapá, al oeste del CGCP, y forman el basamento regional (Fig. 1).

Rocas Post-Batolíticas

Están representadas por dacitas y andesitas miocénicas (Tv) localizadas en la porción norte de la Sierra Cucapá (Barnard, 1968) (Fig. 1). Domos riodacíticos (Qr) forman la estructura volcánica de Cerro Prieto, la

cual consta de dos centros eruptivos que se superponen. Ambos domos están asociados a flujos e intrusiones riodacíticas con una edad de 110 mil a 10 mil años (Boer, 1979).

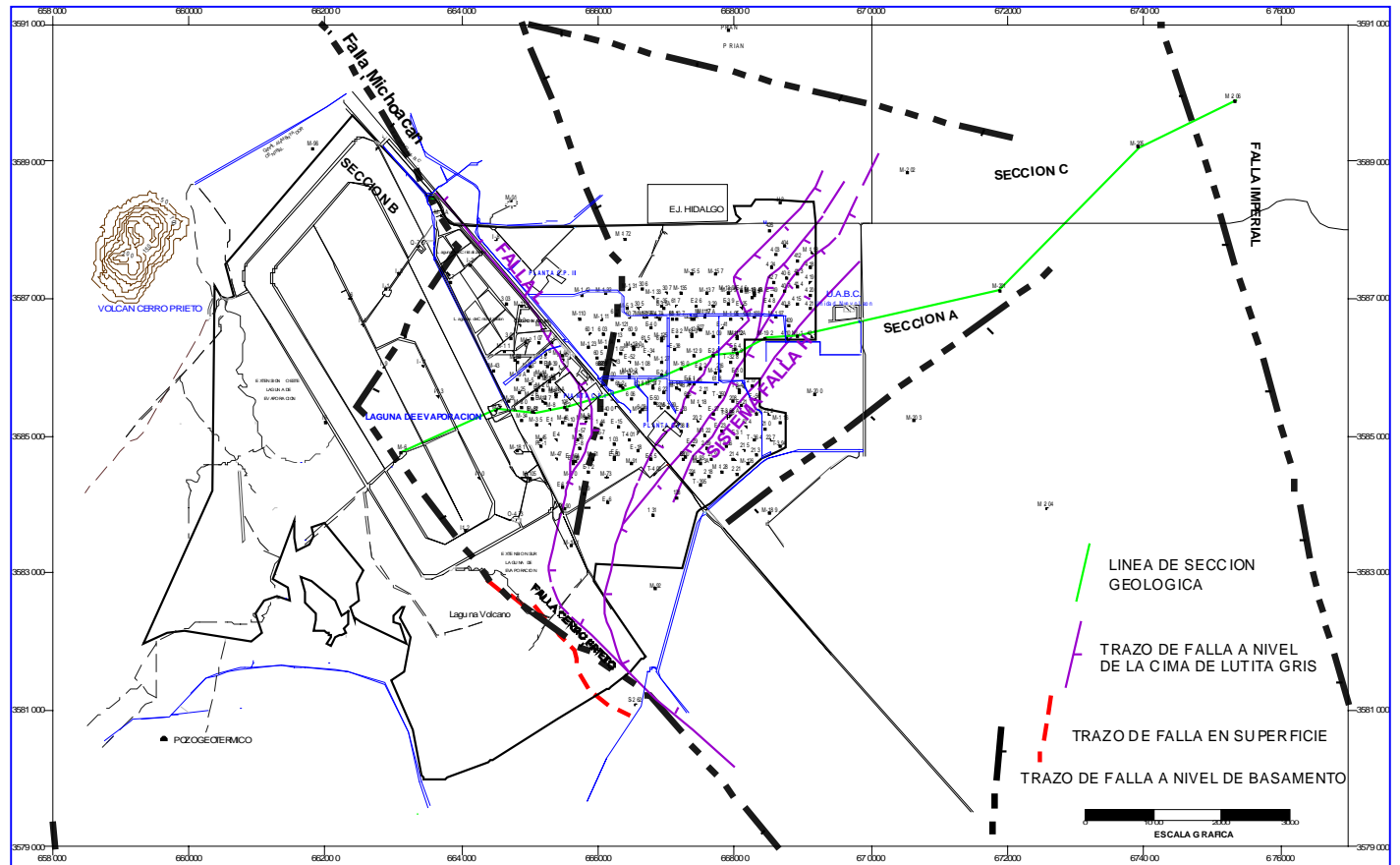


Fig. 2. Plano tectónico del campo de Cerro Prieto

Sedimentos depositados en el Terciario Superior están representados por lutitas de color gris con intercalaciones de areniscas, que alcanzan espesores del orden de los 3000 metros. Estas rocas se encuentran cubiertas por lutitas de color café que sobreyacen a sedimentos aluviales y deltaicos plio-cuaternarios (Qal) (Cobo, 1979), que fueron aportados principalmente por el Río Colorado y rellenan la cuenca tectónica de Cerro Prieto. Estos sedimentos están compuestos por conglomerados y depósitos no consolidados de arena, grava, arcilla, limo y cantos rodados que en conjunto alcanzan un espesor de 2500 metros.

3. Geología del subsuelo

La información obtenida con la perforación de 321 pozos hasta 2004 y con el análisis mineralógico realizado a las muestras de canal, ha permitido definir cinco unidades litológicas principales: el Basamento, la Lutita Gris, la Lutita Café, las Lodolitas y los Sedimentos Clásticos No Consolidados, que se describen a continuación de la más antigua a la más reciente.

Basamento

Pérez (1996) presenta un modelo geológico estructural para la zona de Cerro Prieto, integrando en un solo plano los modelos gravimétricos y magnetométricos existentes, y diferenciando la existencia de tres tipos de basamento que en este trabajo se han denominado Terreno Norteamérica (TNA), Terreno Baja California

(TBC) e Intrusivo Máfico (IM) (Fig. 3). El más antiguo de esos basamentos es el TNA y está representado por rocas metamórficas del Paleozoico-Mesozoico. Le sigue en antigüedad el TBC, estando representado por rocas graníticas del Cretácico. El IM es un intrusivo de composición básica de probable edad Terciario Superior-Plioceno (?), localizado a profundidad entre la falla Cerro Prieto y la falla Imperial. Su presencia se deduce de la anomalía magnética interpretada entre estas dos fallas, y está relacionado probablemente con la fuente de calor que alimenta al yacimiento geotérmico actual.

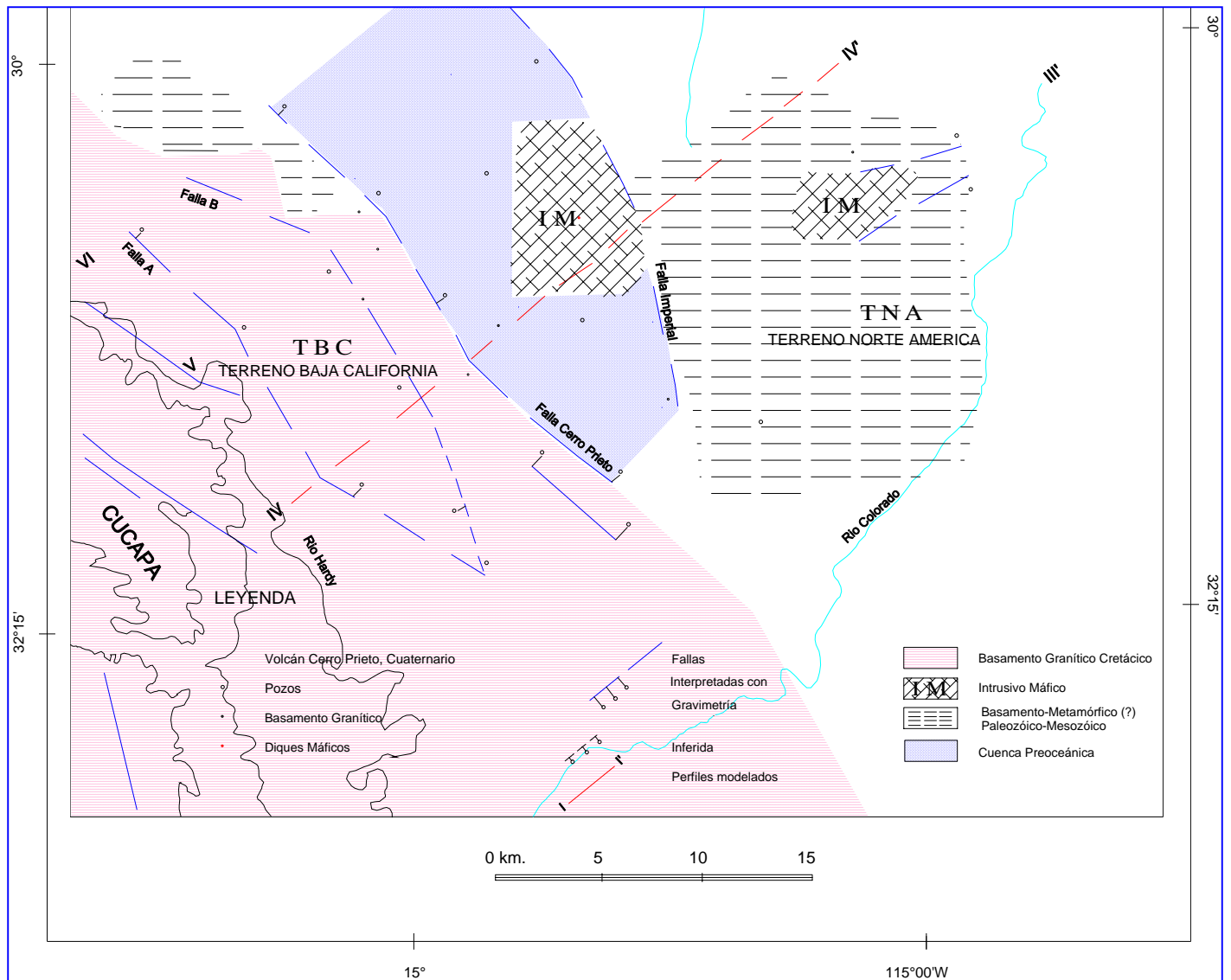


Fig. 3. Modelo de basamento para la zona de Cerro Prieto (Modificado de Pérez, 1996)

En el campo geotérmico, rocas del basamento han sido identificadas en los pozos M-3 (a 2547 m de profundidad), M-96 (2792 m), S-262 (1478 m), I-5 (2250 m) e I-12 (1758 m), tratándose en todos los casos de rocas graníticas de edad Cretácico Tardío, y que por tanto serían parte del Terreno Baja California (TBC). El basamento se profundiza hacia el oriente, dando origen a una cuenca tectónica que alcanza profundidades estimadas de 5200 metros entre las fallas Imperial y Cerro Prieto.

Unidad de Lutita Gris

Esta unidad se formó a partir de sedimentos continentales que rellenaron la cuenca tectónica, y descansa directamente sobre el basamento granítico (TBC) y el intrusivo máfico (IM). La unidad está compuesta por

lutitas y lutitas limolíticas que varían de color gris claro a negro, con intercalaciones de areniscas, que en conjunto dan un espesor promedio, para toda la unidad, de 3000 metros (Fig. 4). La cima de esta unidad se localiza a 398 m de profundidad en la porción oeste del campo (pozo M-6), y se profundiza hacia el oriente alcanzando los 2847 m en el pozo M-201. Por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad tentativa de Terciario, probablemente Mioceno Tardío (Puente y De la Peña, 1978; Cobo, 1979). Cotton y Von der Haar (1979) informan sobre la presencia de microfósiles de *Cassigerinella chipolesis* del Terciario Medio, en los pozos M-38 y M-11 en el área de Cerro Prieto Uno.

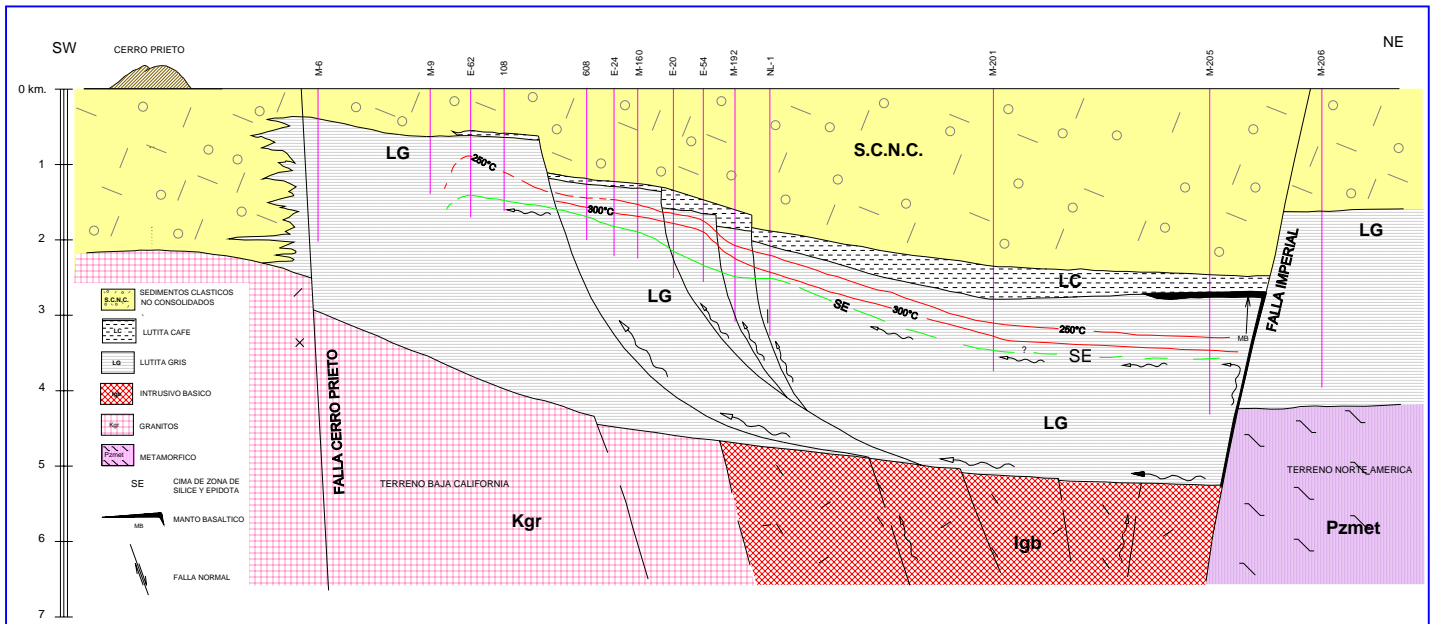


Fig. 4. Sección geológica general A (Para ubicación ver Fig. 2)

Dentro de las lutitas grises se presentan horizontes lenticulares de areniscas permeables, compuestas por fragmentos de cuarzo y escaso feldespato (arcosas), de grano fino a grueso, bien clasificadas, de color blanco (Cobo, 1979), con espesores que van desde unos cuantos centímetros a los 300 m, y porosidad del orden del 22%. Estas areniscas son las que alojan a los fluidos del yacimiento geotérmico (Fig. 4).

Unidad de Lutita Café

Lutitas y lutitas limolíticas de color café descansan en gran parte sobre la unidad de Lutita Gris, presentando intercalaciones de areniscas y arenas muy permeables de color crema, de medianamente a bien clasificadas, cementadas principalmente por carbonatos, con espesores variables propios de ambientes de alta energía. El espesor de esta unidad varía desde unos cuantos metros hasta 500 m (Figura 4). La cima se localiza a una profundidad aproximada de 600 metros en la porción oeste del campo, profundizándose hacia el este hasta alcanzar los 2502 m de profundidad en el pozo M-205.

Lodolitas

Se encuentran sobreyaciendo a las unidades de Lutita Gris y Lutita Café. Su distribución es muy errática y se localizan principalmente en la porción centro oriental del campo geotérmico. Presentan un típico color café con intercalaciones ocasionales de arenas y gravas pobremente consolidadas.

Sedimentos Clásticos No Consolidados

Sobreyacen a las unidades anteriores y están compuestos por arcillas, limos, arenas y escasas gravas, con espesores que varían desde los 400 m hasta los 2500 m. Su comportamiento en el subsuelo es similar al de las demás unidades, encontrándose que su base es más somera en la porción oeste del campo y más profunda en el este (Fig. 4). A esta unidad se le ha asignado una edad del Cuaternario no diferenciado (Cobo, 1981).

4. Minerales hidrotermales

La interacción de los fluidos geotérmicos de alta temperatura con las rocas sedimentarias antes descritas, ha provocado la alteración hidrotermal de los minerales primarios a profundidad, dando como resultado la formación de nuevos minerales secundarios. Estos minerales secundarios han reemplazado en mayor o menor grado al cemento original de las areniscas, de tal modo que ahora estas rocas presentan como cementante una determinada asociación de minerales de origen hidrotermal. Se han identificado cuatro asociaciones o zonas de mineralización, que reflejan las temperaturas que tenía el yacimiento antes de su explotación y que, de menor a mayor temperatura, son las siguientes (Elders *et al.*, 1978; Cobo, 1979):

- Zona con cementante de carbonato de calcio. Es la primera en aparecer a profundidad, generalmente en las areniscas dentro de las unidades de Lodolitas y de Lutita Café; está asociada a temperaturas que van de los 100 a los 200°C.
- Zona con cementante de carbonato de calcio y sílice. Esta zona se encuentra generalmente por debajo de la zona anterior, dentro de la unidad de Lutita Gris. Las temperaturas de los fluidos en esta zona oscilan entre los 150 y los 250°C.
- Zona con cementante de sílice, escaso carbonato y epidota, o zona de transición. Se localiza por debajo de la zona precedente, con temperaturas del orden de los 250°C. A partir de esta zona se localiza el yacimiento geotérmico comercialmente aprovechable.
- Zona con cementante de sílice y epidota. Por debajo de las zonas anteriores y ya dentro de la unidad de lutita gris, se encuentra una zona en la que el cementante de las areniscas está constituido básicamente por minerales de sílice y epidota, cuya temperatura de formación ocurre a partir de los 230°C. En forma general, la cima de la zona de sílice y epidota se localiza a partir de los 1400 m de profundidad en la porción oeste del campo y se profundiza hacia el este, donde se encuentra alrededor de los 3600 m (Fig. 4). La isoterma actual de 300°C concuerda bastante bien con la cima de la zona de sílice y epidota, y a partir de ella quedan terminados la mayoría de los pozos productores.

5. Tectónica

Durante el Terciario Tardío existió en el occidente de Estados Unidos y noroeste de México una tectónica extensional que dio origen a la Provincia de Cuencas y Cordilleras (*Basin and Range*). Axen (1995) ha apuntado que el CGCP se localiza dentro de la "provincia extensional del Golfo que es una zona principalmente de fallamiento normal Mioceno-Plioceno y de topografía de cuencas y sierras... En el Mioceno Tardío-Plioceno Temprano, la extensión generalizada NNE-WSW en la provincia extensional del Golfo creó o amplió el proto-golfo de California antes de la formación de corteza oceánica y del moderno sistema transforme en el golfo".

Un modelo que puede explicar la formación de la cuenca tectónica de Cerro Prieto es el propuesto por Frostick y Stell (1993) (Fig. 5), que describe la formación de cuencas en márgenes de placas divergentes y al que denominan rifts con generación de litosfera (*lithosphere-generated rifts*). De acuerdo con ese modelo, la subsidencia es la primera expresión del *rifting*, y es ocasionada por la extensión que sufre la placa lo que a su vez causa el alargamiento y el adelgazamiento de la litosfera. Entre las principales características de este modelo está el desarrollo temprano de la cuenca de hundimiento, la cual suele atrapar el drenaje de un río. La

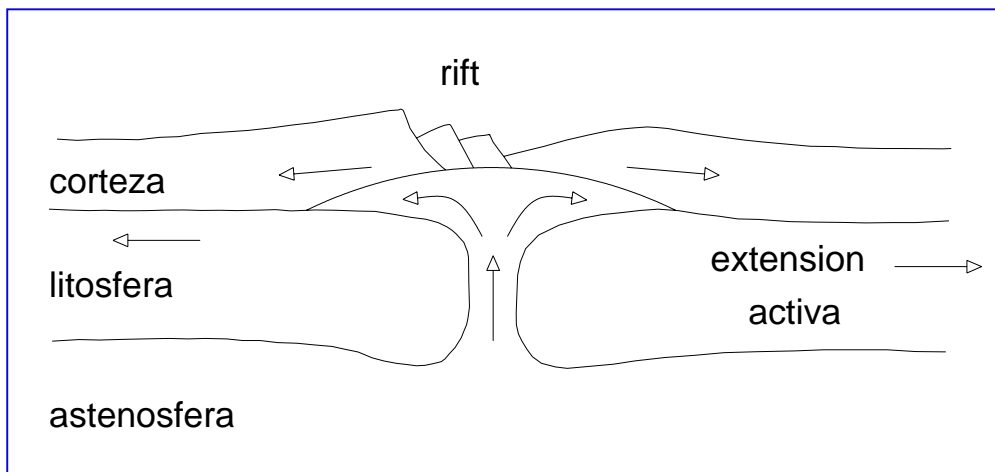


Fig. 5. Modelo de formación de rifts, según Frostick y Stell (1993)

subsistencia temprana y la atracción del drenaje ocasionan una abundante sedimentación clástica y el llenado de la cuenca de hundimiento con depósitos fluviales y lacustres, los cuales se extienden hasta más allá del límite del rift.

Ledezma (1998), por su parte, indica que el modelo pasivo puede explicar la formación de cuencas extensionales o de rift. Este modelo se caracteriza

porque los esfuerzos tectónicos horizontales son el mecanismo principal de formación de la cuenca, presentándose cuatro etapas: extensión, formación de cuencas, relleno sedimentario y vulcanismo. “...Los rifts continentales (valles extensionales terrestres) son comúnmente asimétricos en la mayoría de sus componentes... El elemento principal lo constituye un medio graben... La porción sur de *Basin and Range* puede ser un ejemplo de lo anterior. La manera de acomodar la extensión en los bloques superficiales es mediante el desarrollo de juegos de fallas lístricas normales” (Ledezma, 1998). Durante la etapa de extensión existen emplazamientos magmáticos importantes en la corteza en amplias regiones.

6. Conclusiones

La tectónica extensional que durante el Terciario Superior dio origen a la Provincia de Cuencas y Cordilleras (*Basin and Range*) del occidente de Estados Unidos y noroeste de México, en el área de Cerro Prieto tuvo como resultado la formación de una cuenca del tipo medio graben, entre las fallas Cerro Prieto e Imperial, que está caracterizada por fallas lístricas con dirección predominante NW-SE y NE-SW, las cuales se escalonan en forma general al NE, originando que todo el paquete sedimentario se profundice en esa dirección y por consiguiente el yacimiento geotérmico también.

En respuesta al fallamiento extensional, esta región fue subsidiando paulatinamente, al grado de que hace 10 a 8 millones de años llegó a estar inundada por aguas del Océano Pacífico (Pérez, 1996). La zona de debilidad cortical generada durante el Terciario permitió el emplazamiento, dentro de la cuenca de Cerro Prieto, de un intrusivo de composición básica que ha sido asociado con la denominada anomalía magnética Nuevo León, y que ha sido alimentado por nuevas intrusiones magmáticas originadas por la actual tectónica extensional del Golfo de California.

Como resultado de la actividad tectónica, en la zona del campo de Cerro Prieto se originaron las fallas Imperial y Cerro Prieto, de orientación NW-SE, que afectan al basamento y delimitan la cuenca tectónica en esa zona. Dentro de la cuenca se han formado fallas lístricas que afectan al paquete sedimentario lutítico, con dos direcciones NW-SE (Falla L) y NE-SW (Sistema de la Falla H; ver Fig. 2).

La tectónica extensional que sigue afectando actualmente a la zona de Cerro Prieto está utilizando las estructuras preexistentes, como son las fallas Cerro Prieto, Michoacán e Imperial, para dar origen a una cuenca de dispersión.

El resultado de estos eventos geológicos ha propiciado la formación del yacimiento geotérmico, cuyo modelo conceptual es el siguiente. Los sedimentos terciarios lutíticos con intercalaciones de areniscas constituyen la capa almacenadora, ya que permiten el almacenamiento de los fluidos hidrotermales. Estos son calentados al pasar por la zona donde se localiza el intrusivo básico (asociado con la anomalía magnética Nuevo León), que constituye la fuente de calor, al oriente de la actual zona de explotación, y migran a través de las fallas lístricas hacia los estratos permeables constituidos por las areniscas. Los paquetes superiores de lutitas forman la capa sello. Fluidos de menor temperatura están recargando el yacimiento a través de pozos de inyección localizados en la porción oeste del campo con objeto de mantener la presión del yacimiento (Fig. 6).

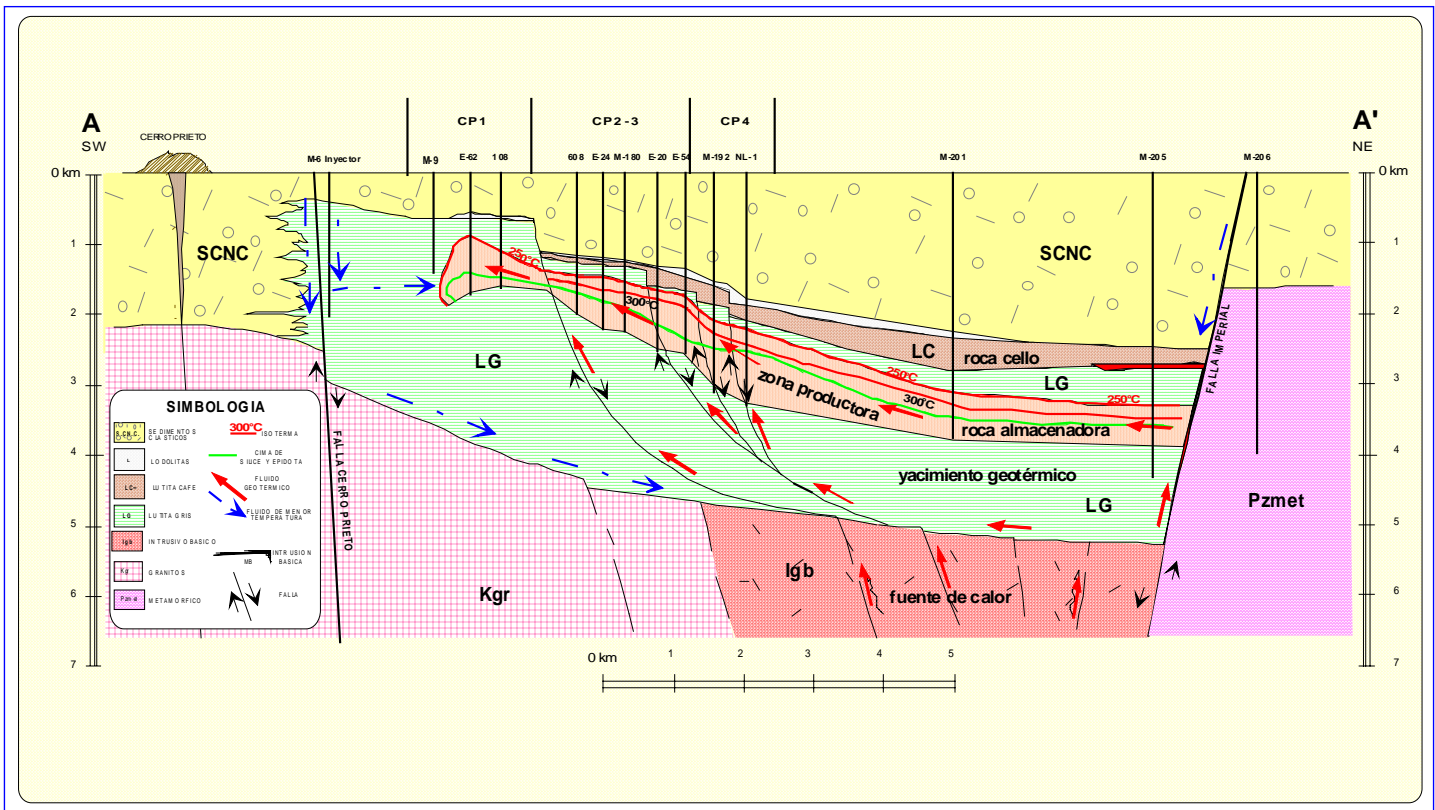


Fig. 6. Modelo conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto (Para ubicación de la sección, ver Fig. 2)

Referencias

- Alonso E., H., González S. A., y Razo M., A. (1985). Geología de los yacimientos geotérmicos de México. Reporte Interno DEX 3/85, CFE. Inédito.
- Axen, G. (1995). Extensional segmentation of the Main Gulf Escarpment, Mexico and United States. *Geology*, Vol. 23, No. 6, pp. 515-518.
- Barnard, F.L. (1968). Structural Geology of the Sierra de los Cucapá, Northeastern Baja California, Mexico, and Imperial County. Unpublished Doctoral Dissertation, University of California.
- Boer, J. (1979). Paleomagnetism of the Quaternary Cerro Prieto, Crater Elegante, and Salton Buttes volcanic domes in the northern part of the Gulf of California rhombochasm. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 91-98.

- Cobo R., J.M. (1979). Geología y mineralogía del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 103-114.
- Cobo R., J.M. (1981). Configuración de los cuerpos litológicos de lodolita, lutita café, lutita gris, zonas de sílice y epidota, y sus relaciones con la tectónica del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Proceedings of the Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 29-42.
- Corona, M. (1996). Actualización del modelo geológico del campo de Cerro Prieto. Informe técnico interno RE-009/96, CFE. Inédito.
- Cotton, M.L., and Von der Haar, S. (1979). Microfossils from Cerro Prieto geothermal wells, Baja California, Mexico. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 162-168.
- Elders, W.A., Hoagland, J.R. and McDowell, S.C. (1978). Hydrothermal mineral zones in the geothermal reservoir of Cerro Prieto. *Proceedings of the First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico*, pp. 68-75.
- Frostick, L.E. and Stell, R.J. (1993). Sedimentation in divergent plate-margin basin. *Int. Ass. Sediment., Spec. Pub.* 20, pp. 111-128.
- Gastil, R.G., Phillips, R.P. and Allison, E.C. (1975). Reconnaissance geology of the State of Baja California. *Geological Society of America, Mem.* 140, 170 p.
- Ledezma, J. (1998). Apuntes del curso sobre cuencas extensionales. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Inédito.
- Lyons, D.J. and Van de Kamp, J. (1979). Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 173-186.
- Pérez P., R.F. (1996). Análisis de los mapas de potencial gravimétrico y magnético del sistema geotérmico Cerro Prieto, Baja California, México. Tesis de Licenciatura en Geofísica, Universidad Autónoma de Nuevo León. Inédito.
- Puente C., I, y De la Peña, A. (1979). Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Proceedings of the First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico*, pp. 17-37.
- Quintanilla, M. (1990). Caracterización tectónica del campo geotérmico de Cerro Prieto con base en el análisis petrológico y magnético del subsuelo. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, B.C. Inédito.
- Siem, M. (1992). The structure and petrology of Sierra El Mayor, Northeastern Baja California, Mexico. Unpublished Master Thesis, University of San Diego State, California.