

Actualización del modelo geológico del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, y zonas adyacentes

Víctor I. Gallardo Federico, Griselda Macías Valdez y Pedro Salas Contreras

Residencia General de Cerro Prieto, Residencia de Estudios, Departamento de Geología y Geofísica.

Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México. E-mail: griselda.macias@cfegob.mx

Resumen

Con la información geológica de más de 400 pozos perforados en el campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) y sus alrededores, complementada con la elaboración e interpretación de más de 42 secciones estructurales integradas con información geofísica (gravimétrica en profundidad, métodos potenciales y electromagnéticos, esencialmente), se ha actualizado, afinado y modificado el modelo geológico del CGCP. Esta actualización partió de un enfoque de carácter regional concluyendo en uno local, explicando hipotéticamente la evolución tectónica a partir de una falla de bajo ángulo tipo *detachment* (extensional) que provocó el rebote isostático y el levantamiento de cuatro grandes bloques granitoides (Juárez, Cucapah, Alto Cerro Prieto e Imperial), delimitados por cuencas sin-extensionales y sin-sedimentarias que fueron llenadas por depósitos continentales que evolucionaron a transicionales y marinos someros (cuencas hambrientas). Posteriormente existió un régimen tectónico transtensional que provocó la reactivación del bloque Alto Cerro Prieto y la activación de las fallas que hoy en día operan con movimientos transtensionales. Se propone que estructuralmente el CGCP se encuentra dentro de un semigraben regional delimitado por las fallas Cucapah e Imperial, y que con la reactivación del Alto Cerro Prieto se activó la falla del mismo nombre de manera oblicua, delimitando un subsistema tipo medio graben a nivel local (entre la Sierra Cucapah y Alto Cerro Prieto). Dentro del mismo semigraben se encuentra otro similar entre las fallas Michoacán e Imperial, la cual también se comporta como oblicua.

Las dos fallas oblicuas se pueden relacionar posiblemente con el aporte de calor, pues ponen en contacto intrusivos relativamente más recientes asociados con el régimen transtensional actual. Esto explicaría la anomalía Nuevo León, cuya migración de fluidos hidrotermales es hacia el horst Cerro Prieto, sirviendo de conducto las fallas H y Michoacán, respectivamente. También explicaría otra zona de interés identificada a partir de esta actualización del modelo geológico, que es un centro de depósito ubicado entre el horst Cerro Prieto y la Sierra Cucapah: dado que la falla Cerro Prieto actúa como oblicua, probablemente ha provocado también el contacto de algún intrusivo más reciente que genera la migración de fluidos hidrotermales hacia la falla Cucapah, dando lugar a la zona termal Calderón. La reactivación del bloque Alto Cerro Prieto provocó que las formaciones de ambientes deltaicos y abanico-deltas se encuentren aflorando en superficie, siendo estas mismas rocas las que alojan a los fluidos geotérmicos a 600 m de profundidad en el Alto Cerro Prieto), 1600 m en el bloque intermedio y a 2200 m o más en el bloque bajo).

Mediante la revisión de la información litológica de muestras de canal de los pozos, se comprobó que aquellos ubicados al oriente del CGCP (pozos inyectores) cortan una zona de inter-digitación entre ambientes deltaicos y abanico-deltas de la formación productora del campo. La determinación del ambiente sedimentológico de esta secuencia brindó información valiosa para comprobar que la falla Cerro Prieto presenta un rumbo NW-SE con inclinación de 75 a 85° al SW, cuya traza se ubica realmente más al oeste de donde se había sugerido anteriormente en otros modelos. Se sugiere también que areniscas y areniscas conglomeráticas con bioturbaciones, cementadas por carbonato y sílice,

reportadas en pozos inyectores y en afloramientos, son probablemente las mismas que afloran en la base del Volcán Cerro Prieto y otras regiones.

Palabras clave: Modelo geológico, estructuras, tectónica, fallas oblicuas, semigraben, cuencas sin-sedimentarias y sin-extensionales.

1. Objetivo

Para la actualización del Modelo Geológico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se trazaron los siguientes objetivos:

- Aclarar que el sistema de Fallas H no corresponde a fallas lístricas.
- Comprobar el echado de la falla Cerro Prieto y su aparente continuación hacia el NE.
- Definir las condiciones sedimentológicas al oeste del campo geotérmico.

2. Antecedentes

Diversos modelos geológicos han sido propuestos en el CGCP desde sus inicios: Alonso y Moser en 1964, Mercado en 1968, De la Peña y Puente en 1978, Cobo en 1979, Alonso et al. en 1985, y Corona en 1996. Hasta aquí se presentaron modelos con una descripción de la secuencia estratigráfica que rellena la cuenca tectónica y sugieren bloques escalonados formados por múltiples fallas normales por las cuales ascienden los fluidos hidrotermales. Sin embargo no muestran la fuente de calor que da origen al CGCP.

Lira (2005) propuso el término de fallas lístricas dentro del CGCP y un intrusivo básico como fuente de calor relacionándola con la anomalía Nuevo León.

Aguilar Dumas (2006) define en su modelo tres estructuras principales, considerándolas de oeste a este: a) La falla Cerro Prieto, con rumbo NO-SE, con echado al SO de 75°. b) La falla Michoacán, que pertenece al mismo sistema regional de la Falla Cerro Prieto, con buzamiento al noreste, y c) la falla H, más reciente que las anteriores, de rumbo NE-SO con echado al SE de 45° a 65°.

3. Método de trabajo

Para la actualización del Modelo Geológico se elaboraron e interpretaron más de 42 secciones geológicas con información de 415 pozos perforados en el CGCP que muestran las estructuras interpretadas con el basamento gravimétrico, análisis sedimentológico de las muestras de canal que complementan la secciones con los ambientes de depósito durante su formación, y se realizaron bloques diagramáticos para mostrar la evolución tectónica y sedimentaria de la cuenca.

Para entender la geología local fue necesario partir de un enfoque regional donde se proponen bloques diagramáticos hipotéticos, así como ambientes sedimentológicos imperantes durante la tectónica extensional y transtensional que dieron origen a las rocas que componen la columna geológica del área de estudio. Se propone un medio graben regional delimitada entre las fallas Cucapah e Imperial, donde se encuentran evidencias geológicas de la reactivación del alto de Cerro Prieto dividiendo el medio graben en dos.

Para el análisis de la ubicación y buzamiento de la Falla Cerro Prieto se interpretaron dos secciones y, se definieron las condiciones sedimentológicas que se encuentran sobreyaciendo el alto Cerro Prieto. Se corroboró estructuralmente que la falla Cerro Prieto se ubica más hacia el oeste de donde se había trazado y que presenta buzamiento oblicuo hacia el suroeste.

En la zona de la Laguna Vulcano se encuentran afloramientos de areniscas conglomeráticas que se extienden en superficie y muy someramente en los pozos inyectores hasta las inmediaciones del Volcán Cerro Prieto. Estas areniscas cementadas por carbonato de calcio y sílice muestran un cambio de facies de abanico delta a deltaicas.

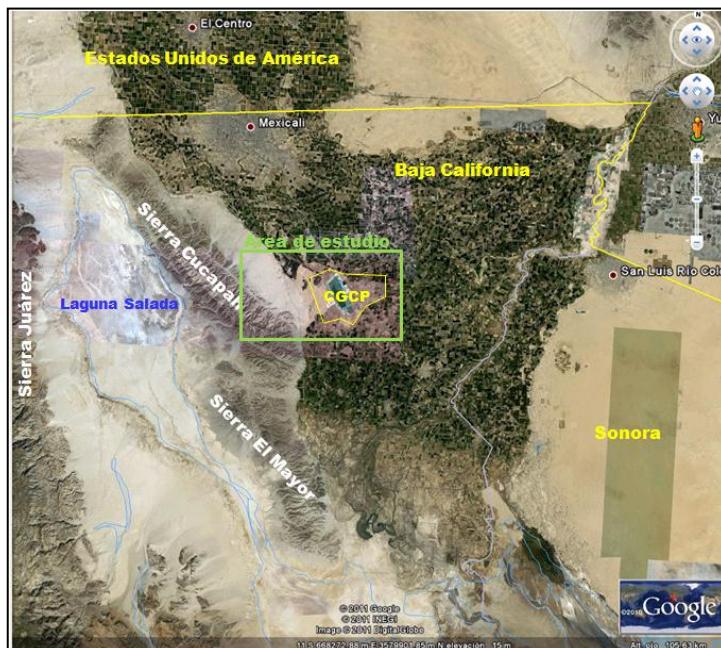


Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

Pre-rift, Syn-rift y Post-rift como se muestra a continuación (Figura 2).

En la Figura 3 se representa esquemáticamente la evolución tectónica y estratigráfica regional que desde la extensión. (A) Partiendo de la teoría de una falla de bajo ángulo (“detachment”) que corta a las unidades pre-batolíticas y batolíticas, se produce un levantamiento por isostasia que provoca una etapa erosiva. B) La detachment provoca adelgazamiento de la corteza y el rebote isostático de los intrusivos granitoides, provocando el levantamiento de la Sierra Juárez. C) Durante el

4. Localización

El área de estudio se encuentra ubicada en la planicie aluvial del Valle de Mexicali, 21 km al sur de la ciudad de Mexicali, Baja California, entre los meridianos $115^{\circ} 25' 31''$ y $115^{\circ} 07' 47''$ de longitud oeste y los paralelos $32^{\circ} 27' 19''$ y $32^{\circ} 20' 35''$ de latitud norte, abarcando un área de 336 km^2 . Dentro de esta área de estudio se encuentra el CGCP, entre los meridianos $115^{\circ} 12'$ y $115^{\circ} 18'$ de longitud oeste y los paralelos $32^{\circ} 22'$ y $32^{\circ} 26'$ de latitud norte (Figura 1).

5. Modelo geotectónico regional

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el modelo tectónico regional de Bosence (1998) que representa el tipo de sedimentación ocurrida durante los eventos

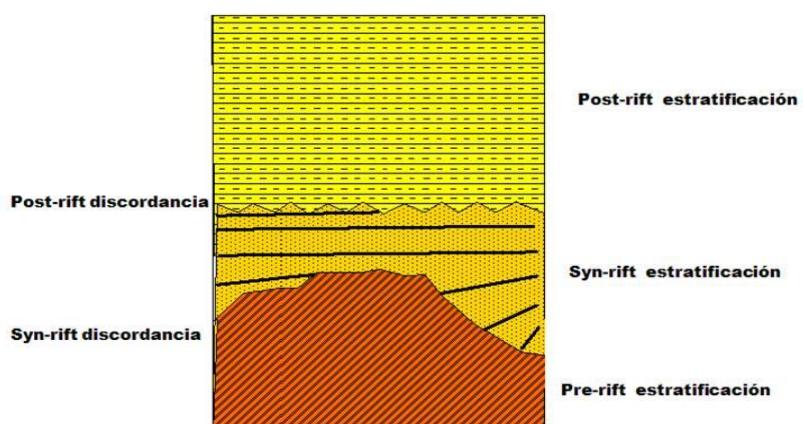


Fig. 2. Ejemplo de evolución tectónica de un rift (Bosence, 1998).

deslizamiento de la falla detachment y el rebote isostático de los granitoides (Cucapah y Cerro Prieto) se producen cuencas que son llenadas por depósitos sin-sedimentarios tipo abanico aluvial.

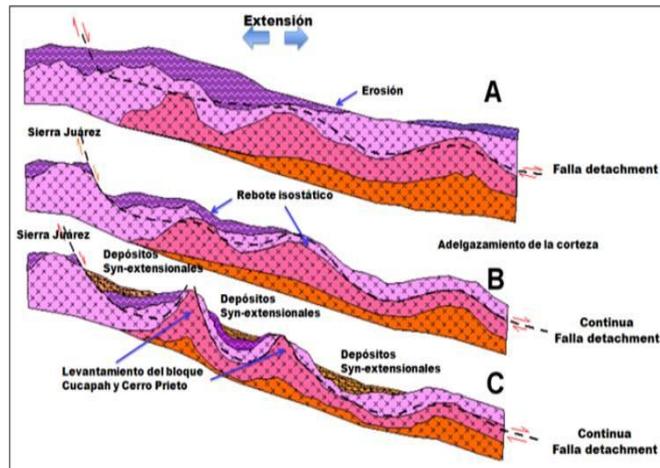


Fig. 3. Bloque diagramático mostrando la evolución tectónica y estratigráfica regional (etapas A, B y C).

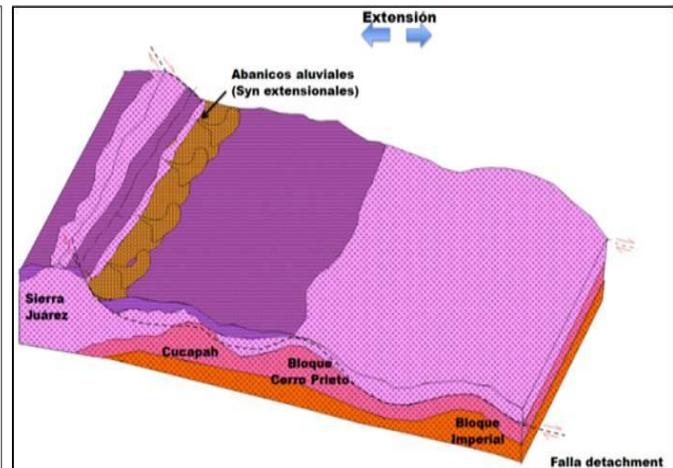


Fig. 4. Bloque diagramático mostrando el origen de los depósitos sin-sedimentarios (abanicos aluviales).

En el siguiente bloque diagramático se observa que las unidades pre-batolíticas y batolíticas son cortadas por la falla detachment produciendo su adelgazamiento y la formación de depósitos sin-sedimentarios (abanicos aluviales) (Figura 4).

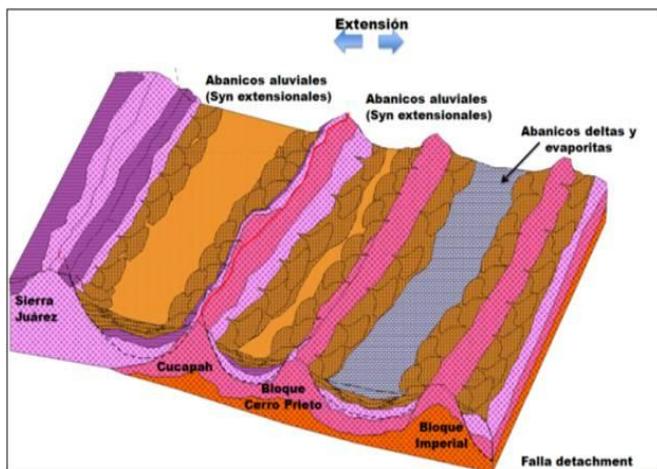


Fig. 5. Bloque diagramático que indica la evolución y surgimiento de los bloques Cucapah, Cerro Prieto e Imperial.

que podrían estar relacionadas a las aguas salinas y la presencia de ácido sulfhídrico en el CGCP.

Después de su formación, estas tres cuencas alargadas delimitadas por los cuatro bloques mencionados continuaron rellenándose por material sedimentario continental y marino durante la fase de extensión. Este tipo de depósitos se encuentra aflorando en los bordes de las sierras Cucapah, El Mayor y Centinela.

Sin embargo, después ocurrió un cambio de régimen tectónico de tipo extensional a transtensional, y durante este periodo probablemente existió un periodo de relativa calma. Durante el mismo se depositaron sedimentos de facies deltaicas con cambio de facies a abanicos deltas. También durante el depósito ocurrió subsidencia permitiendo que los bloques Cucapah e Imperial fueran cubiertos totalmente por los depósitos deltaicos. El bloque Cucapah quedó expuesto permitiendo su erosión y depositando facies de abanico deltas con inter-digitizaciones a deltaicas. Este cambio de facies ocurrió justamente por encima del bloque Cerro Prieto (Figura 6).

Estas facies deltaicas con cambios a abanicos deltas son las rocas almacenadoras de los fluidos geotérmicos que componen el yacimiento del CGCP, conocidas como Unidad de Lutita Gris. En casi todos los pozos se han perforado facies deltaicas más profundas con mayor contenido de lutitas limolíticas y lutitas oscuras a grises. Sin embargo por encima del Horst Cerro Prieto estas areniscas afloran y se observan areniscas conglomeráticas con bioturbaciones que se mostrarán más adelante (Figura 7).

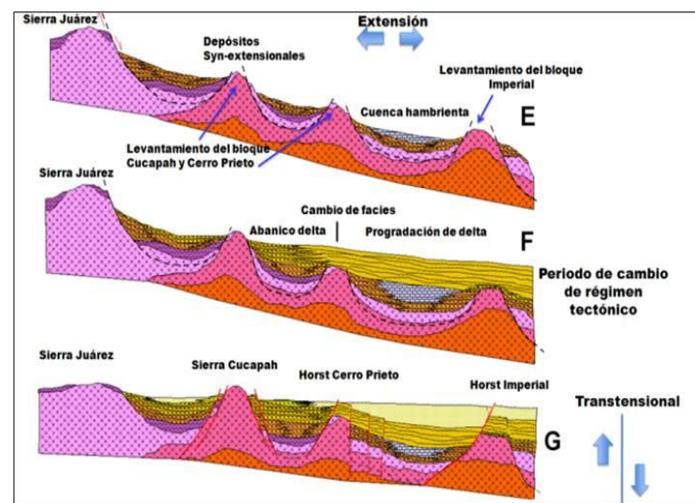


Fig. 6. Evolución tectónica y estratigráfica regional (etapas E, F y G).

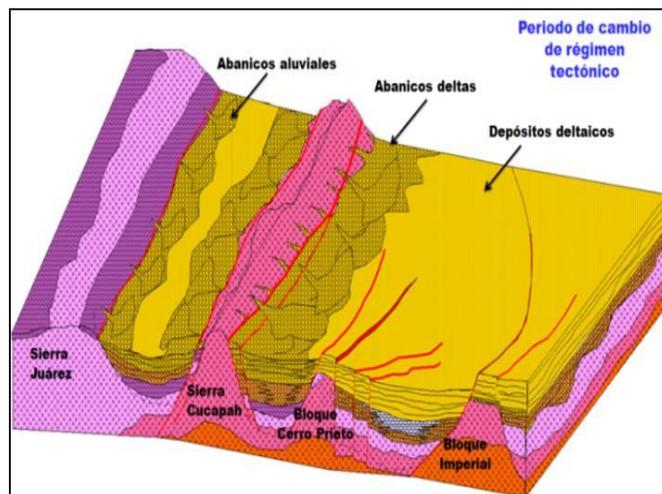


Fig. 7. Bloque diagramático. Período de cambio de régimen tectónico.

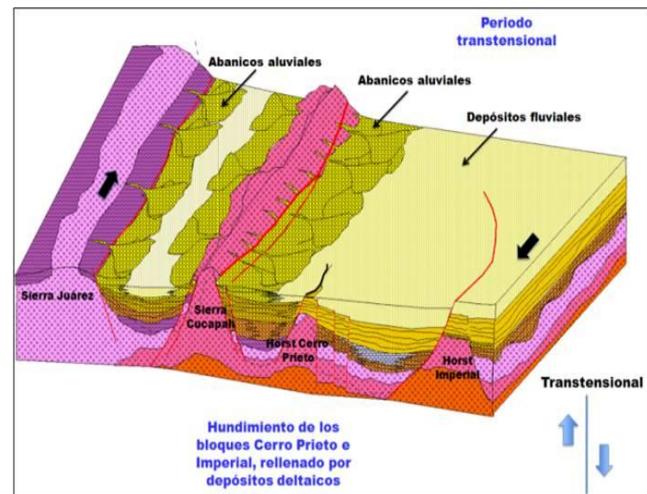


Fig. 8. Bloque diagramático. Período de reactivación del cambio tectónico transtensional.

Durante la etapa transtensional hubo regresiones marinas permitiendo la sedimentación de depósitos fluvio-deltaicos provenientes del Río Colorado, a los cuales se les conoce como la Unidad de Sedimentos Clásticos no Consolidados (Figura 8).

El continuo movimiento subsecuente después del período transtensional provocó la reactivación de la Falla Juárez así como el afloramiento de las distintas fallas regionales que son expuestas actualmente en la Sierra Cucapah (fallas Laguna Salada, Borregos y Cucapah), al este la Falla Imperial y las que componen la cuenca pull-apart (fallas Cerro Prieto, Michoacán y sistema H) (Figura 9).

Todas esas fallas muestran echados entre 75 a 85°, pero las fallas Imperial y Cerro Prieto cambian de rumbo, observándose oblicuas, lo que indica que están formando dos medios graben dentro de un graben de mayor dimensión, entre las fallas Cucapah e Imperial (Figura 10).

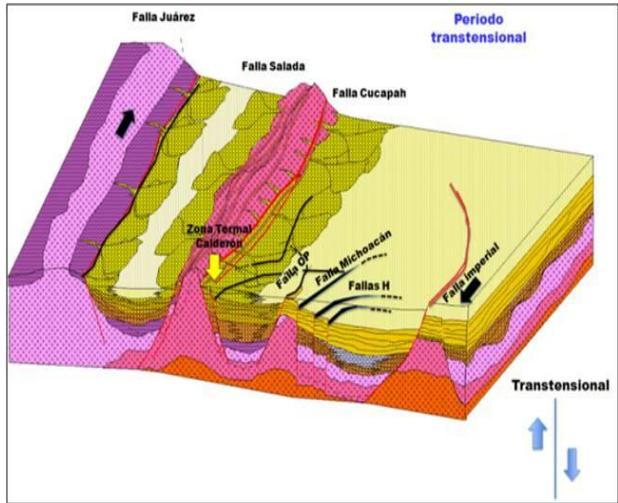


Fig. 9. Bloque diagramático que muestra la evolución y surgimiento de fallas transtensionales.

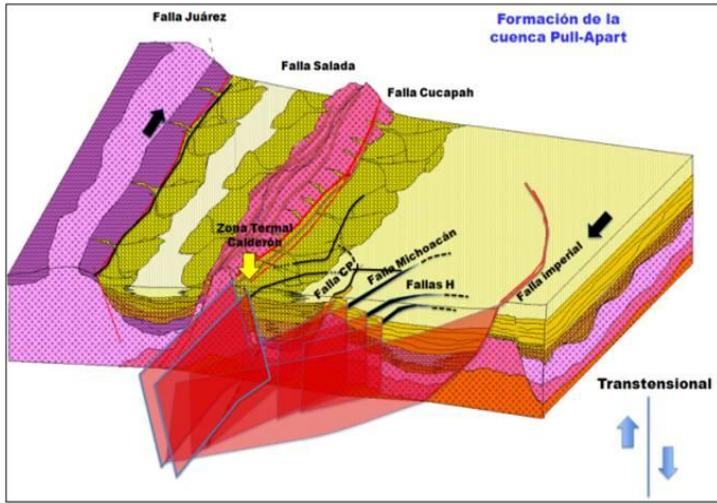


Fig. 10. Bloque diagramático que muestra la evolución de la cuenca pull-apart delimitada por las fallas Cucapah e Imperial.

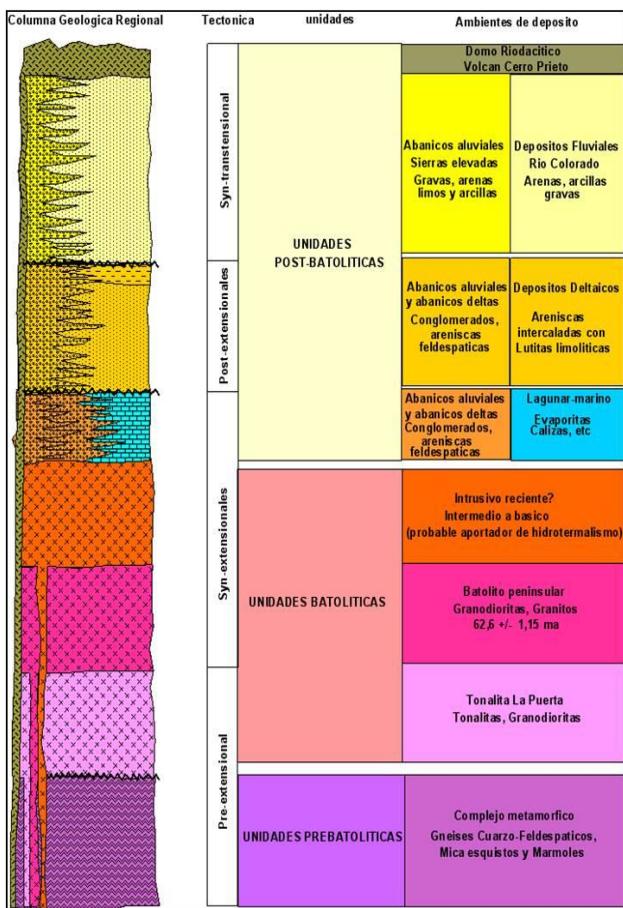


Fig. 11. Columna geológica generalizada.

Partiendo de esta secuencia de bloques diagramáticos y del tipo de depósitos sedimentarios, se propone una columna geológica regional generalizada desde la Sierra Juárez hasta el Bloque Imperial que muestra los eventos tectónicos ocurridos y los ambientes de depósitos ocurridos. En esta columna es donde se encuentran las rocas que componen el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto (Figura 11).

Cabe mencionar que los depósitos sedimentarios ocurridos durante la etapa post-extensional son aquellos que corresponden a las unidades post-batolíticas y son las rocas que hospedan a los fluidos geotérmicos en el CGCP, cuyo ambiente de depósito corresponde a abanicos aluviales y abanicos delta (conglomerados, areniscas feldespáticas y depósitos deltaicos), como son areniscas intercaladas con lutitas limolíticas. Esta para-secuencia se encuentra delimitada por dos discordancias que indican el cambio sin-extensional a sin-transtensional.

Para soportar el presente trabajo se consultó el estudio realizado por el CICESE donde se muestra una interpretación basada en líneas sísmicas 2D en la zona norte del Golfo de California. Las líneas delimitan la Cuenca de Wagner y Consag como dos

estructuras tipo medio graben separadas por una zona de transferencia (Figura 12).

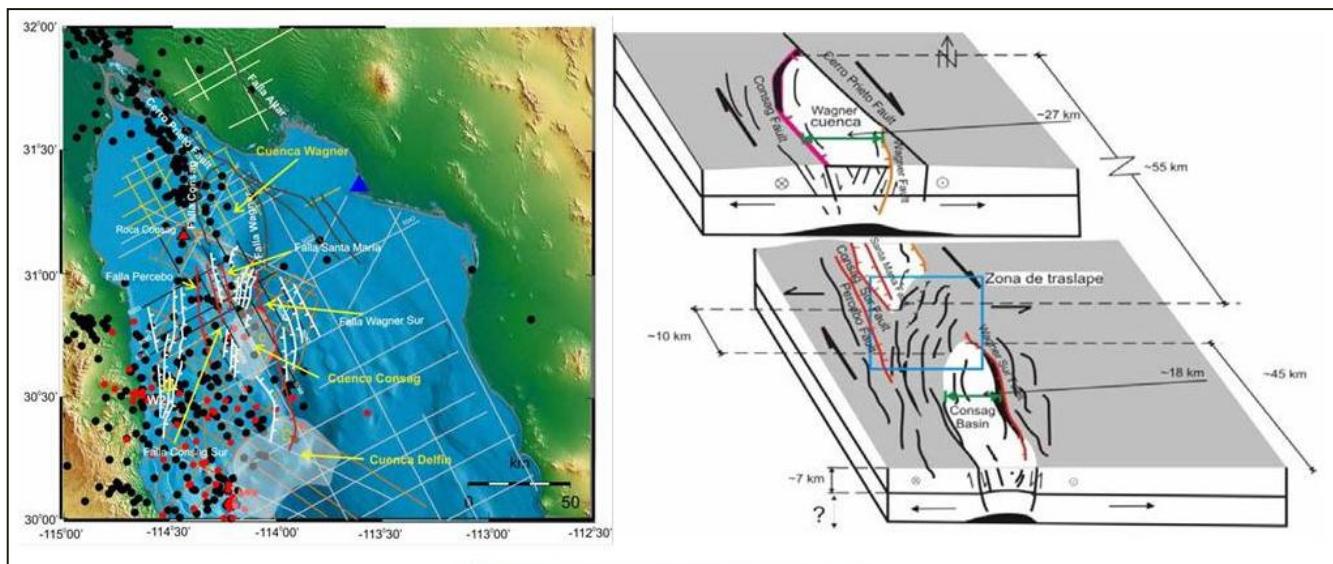


Fig. 12. Interpretación sísmica estructural realizada por el CICESE.

6. Aspectos sedimentológicos y estructurales

Con la interpretación de 42 secciones geológicas realizadas en el CGCP y con información gravimétrica del basamento, se realizó la siguiente sección geológica generalizada para definir los altos estructurales que componen los mencionados bloques Cucapah, Cerro Prieto e Imperial, con dos medio graben (Figura 13).

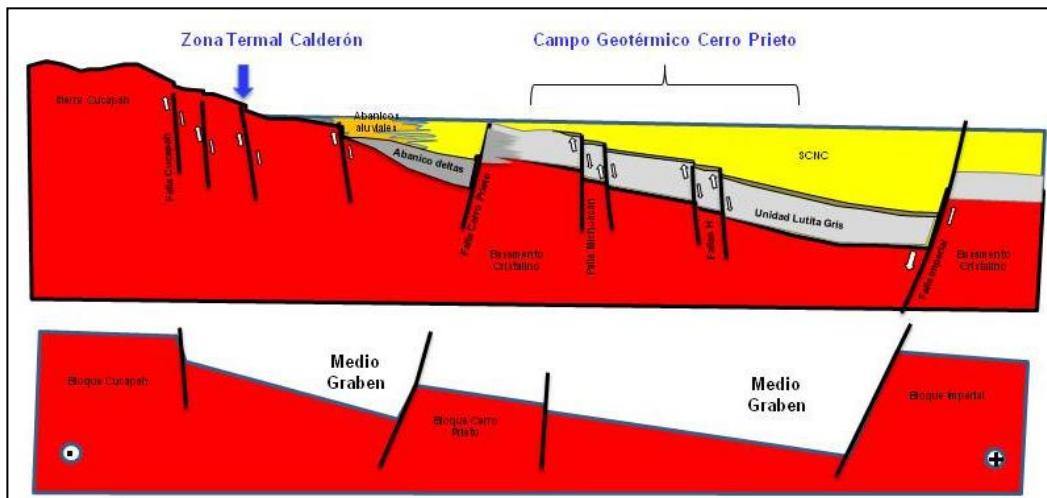


Fig. 13. Sección geológica estructural del CGCP hasta la Sierra Cucapah, indicando dos medio graben.

Durante el desarrollo y análisis de la información geológica de los pozos perforados en el CGCP, se analizó la información litológica de muestras de canal de los pozos que se encuentran al oeste del campo sobre el horst Cerro Prieto.

En modelos geológicos anteriores se había interpretado que los Sedimentos Clásticos no Consolidados (SCNC) sobreycacen al basamento granítico. Sin embargo, los pozos I-5, I-12, I-14 y S-262 perforados al oeste del campo cortan potentes espesores de la Unidad de Lutita Gris. No se había prestado mayor

importancia a este hecho, por no tener relevancia geotérmica. Pero se realizaron varios modelos que ponían encima del horst Cerro Prieto un cambio de facies entre la unidad de Lutita Gris y los SCNC. Esta idea fue retomada Lira en 2005, quien además de señalar tal cambio de facies entre unidades más antiguas, correspondientes a la Unidad de Lutita Gris con los SCNC, ubicaba la falla Cerro Prieto con buzamiento hacia el noreste. Es decir, la cuenca transtensional estaba delimitada por las fallas Cerro Prieto e Imperial, además de que se postulaba al sistema de fallas H como de bajo ángulo.

Sin embargo, Aguilar Dumas (2006) propuso un nuevo modelo geológico definiendo tres estructuras principales de oeste a este, sugiere que los SCNC sobreyacen al basamento en los pozos perforados en el horst Cerro Prieto y traza la falla Cerro Prieto al este de los pozos I-5, I-14, M-6 e I-12, con buzamiento hacia el oeste.

Con la información obtenida de las 42 secciones estructurales analizadas se resuelve el problema del buzamiento hacia el oeste de la falla Cerro Prieto. Así, esta falla forma parte de una estructura nombrada Horst Cerro Prieto y forma un medio graben entre este y la Cucapah. La otra falla con buzamiento hacia el noreste es la falla Michoacán, que delimita el extremo este del Horst Cerro Prieto. Por lo tanto, se propone que la traza de la Falla Cerro Prieto se reubique hacia el oeste de los pozos inyectores.

Para definir esta zona que aun presentaba controversia en cuanto a su sedimentología y rasgos estructurales, se analizaron los ambientes de depósito con base en la ocurrencia de facies sedimentarias a partir del análisis de las descripciones litológicas de las muestras de canal de los pozos perforados en el área del CGCP. Además, se consultó literatura de apoyo.

Basados en el análisis de las muestras de canal de los pozos ubicados al oeste del CGCP, se observó que existen areniscas de grano fino a medio, cementadas por carbonato de calcio y sílice deleznables, y algunas silicificadas muy compactas, particularmente en los pozos I-5, I-12, I-14 y S-262. Estas características se presentan en todos los pozos ubicados al oeste del CGCP.

Había una incongruencia en la descripción litológica de los pozos I-14 y M-6, cuya distancia entre sí es de 20 metros, ya que en el primero se describían SCNC desde la superficie hasta una profundidad de 1345 m y en el M-6 de la superficie a 398 m de profundidad. Como parte de este trabajo, las rocas clasificadas como areniscas descritas en el pozo I-14 a partir de 380 m se reclasificaron, considerándose como partes de bloques consolidados dentro de los SCNC, mientras que en el pozo M-6 la cima de la Unidad de Lutita Gris se definió a 398 m.

Así, partiendo de un enfoque distinto se prepararon tablas con la descripción litológica actualizada de los pozos considerados más conflictivos, y se aprovechó la definir el posible ambiente de depósito, como se presenta a continuación.

Pozo I-5

Prof. (m)	Descripción litológica general	Ambiente
12 a 87	Areniscas cementadas por carbonato, arcillas y gravas	Abanico delta interfaces a deltaico
90 a 147	Areniscas cementadas por carbonato, gravas, lodoletas cafés y verdes	Abanico delta interfaces a deltaico
147 a 186	Arenas y gravas	Abanico aluvial

189 a 438	Areniscas cementadas por carbonato, gravas, Iodolitas cafés y verdes	Abanico delta interfaces a deltaico
444 a 537	Arenas, gravas, Iodolitas y esporádicos intervalos de arcillas.	Abanico delta interfaces a deltaico
537 a 576	Gravas y Iodolitas	Abanico delta
582 a 750	Arenas	Abanico delta
753 a 846	Arenas, gravas e intervalos de Iodolita	Abanico delta
846 a 1011	Arenas	Abanico delta
1014 a 1296	Arenas, areniscas cementadas por carbonato, gravas	Abanico delta interface a deltaico
1299 a 1485	Arenas y gravas	Abanico delta
1488 a 1536	Arenas, areniscas cementadas por carbonato, gravas (Relices de falla de 1497 a 1569)	Abanico delta interfaces a deltaico
1539 a 1662	Arenas, areniscas cementadas por carbonato, gravas (Trazas de Lutita Gris a 1539)	Abanico delta interfaces a deltaico
1662 a 1767	Arenas, gravas y Lutita café.	Abanico delta
1767 a 1810	Arenas, areniscas cementadas por carbonato, gravas, Lutita café y trazas de Lutita gris	Abanico delta interfaces a deltaico
1839 a 1902	Arenas, areniscas cementadas por carbonato, Lutita Café y gris	Abanico delta interfaces a deltaico
1810 a 2142	Arenas, areniscas cementadas por carbonato, gravas. Lutita Café y gris. Relices de falla de 2013 a 2232)	Deltaica interfaces a abanico delta
2145 a 2232	Fragmentos de cuarzo con Lutita Gris, areniscas cementadas por carbonato y sílice y biotita	Basamento cristalino

Tabla 1. Columna litológica actualizada del pozo I-5.

Con el resultado del análisis del pozo I-5 se definió que las areniscas que se presentan a 12 m corresponden a un cambio de facies de abanico delta a deltaico, lo que indica que esta unidad corresponde a la misma Unidad de Lutita Gris pero en un ambiente más somero, donde hay mayor abundancia de areniscas con presencia de areniscas conglomeráticas y aporte de la Sierra Cucapah, con interdigitizaciones de sedimentos deltaicos. Es decir, existía una zona con un ambiente menos profundo. En este pozo estas areniscas deltaicas se encuentran intercaladas con gravas y arenas de ambiente abanico delta. Su poca o nula cohesión probablemente se deba a procesos diagenéticos ocurridos por hidrotermalismo, aunque también puede ser que el motivo de que la roca esté disgregada sea la perforación, debido a lo cual se clasificaron originalmente como arenas correspondientes a los SCNC.

Pozo S-262

Prof. (m)	Descripción litológica general	Ambiente
0 a 42	Arcillas, arenas cuarzo feldespáticas	Abanico aluvial
42 a 61	Areniscas cementadas por carbonato, arenas	Abanico delta interfaces a deltaico
61 a 87	Arcillas, limolitas, areniscas y arenas	Abanico delta

		interfaces a deltaico
87 a 198	Arenas, gravas	Abanico delta
198 a 240	Arenas, areniscas, gravas	Abanico delta interfaces a deltaico
240 a 285	Arenas, gravas	Abanico delta
285 a 486	Arenas, gravas, esporádicos intervalos de areniscas	Abanico delta interfaces a deltaico
486 a 555	Arenas, gravas, areniscas	Abanico delta interfaces a deltaico
555 a 813	Lodolitas, arenas y areniscas en intervalos	Abanico delta interfaces a deltaico
813 a 873	Lodolitas, arenas, gravas y areniscas	Abanico delta interfaces a deltaico
873 a 996	Lodolitas, arenas, gravas	Abanico delta
996 a 1167	Lodolitas, areniscas, arenas, gravas	Abanico delta interfaces a deltaico
1173 a 1326	Areniscas, lodolitas, arenas y Lutita gris	Delta interfaces a abanico delta
1326 a 1390	Lodolitas, areniscas,	Delta interfaces a abanico delta
1390 a 1401	Areniscas cementadas por sílice y gravas,	Delta interfaces a abanico delta
1401 a 1431	Arenas y gravas	Abanico delta
1431 a 1440	Areniscas cuarzo feldespáticas, arenas y gravas	Delta interfaces a abanico delta
1443 a 1455	Arenas, areniscas y gravas	Abanico delta interfaces a deltaico
1455 a 1473	Arenas angulosas y gravas con areniscas	Conglomerado basal
1473 a 1763	Granodiorita	Basamento cristalino

Tabla 2. Columna litológica actualizada del pozo S-262.

En el pozo S-262 se define la cima de la unidad deltaica-abanico delta a 42 m de profundidad, y es precisamente ahí donde se resuelve una zona de confusión, ya que corresponde al pozo geotérmico cuyo basamento está más somero. En las descripciones anteriores se presentaba a la unidad de los SCNC como sobreyaciendo directamente al basamento granodiorítico, habiéndose interpretado erróneamente como una zona de erosión.

Pozo I-12

Prof. (m)	Descripción litológica general	Ambiente
0 a 85	Gravas y arenas	Abanico aluvial
85 a 475	Areniscas cementadas por sílice, arcilla blanca en intervalos.	Delta interfaces a abanico delta
475 a 1230	Areniscas cementadas por sílice, lutitas	Delta interfaces

	limolíticas, arcillas blancas y biotita en intervalos.	a abanico delta
1230 a 1485	Areniscas cementadas por sílice, trazas de lutitas cafés y biotita en intervalos.	Delta interfacies a abanico delta
1485 a 1740	Areniscas cementadas por sílice, trazas lutitas cafés, arcillas blancas y biotita en intervalos.	Delta interfacies a abanico delta
1740 a 1800	Areniscas cementadas por sílice de calcio, fragmentos de arenas arcósicas de grano grueso	Delta interfacies a abanico delta
1750 a 1790	Arenas arcósicas de grano grueso	Conglomerado basal
1790 a 1849	Granodiorita	Basamento cristalino

Tabla 3. Columna litológica actualizada del pozo I-12.

En el pozo I-12 se observó que las areniscas deltaicas se encontraron a 85 m, y así se mantiene en todo el intervalo hasta los 1790 m de profundidad, donde se encuentra la granodiorita.

Pozo I-14

Prof. (m)	Descripción litológica general	Ambiente
0 a 24	Arcillas	Abanico aluvial
27 a 102	Arenas, arcillas y trazas de gravas	Abanico aluvial
105 a 165	Arenas y trazas de gravas	Abanico aluvial
168 a 293	Arenas, arcillas y trazas de gravas	Abanico aluvial
296 a 314	Arenas, arcillas y trazas de gravas y Lutita Café	Abanico delta interfacies a deltaico
317 a 347	Arenas, arcillas y trazas de gravas	Abanico delta interfacies a deltaico
350 a 400	Arenas, arcillas, trazas de gravas, Lutita Café, areniscas y Lutita Gris	Abanico delta interfacies a Deltaico
403 a 421	Arcillas, Lutita Gris, areniscas y arenas	Abanico delta interfacies a deltaico
421 a 478	Lutita Gris, arenas, areniscas y arcillas	Delta interfacies a abanico delta
478 a 824	Arenas, Lutita Gris y Café, areniscas cementadas por carbonato, arcillas y trazas de gravas	Abanico delta interfacies a deltaico
824 a 896	Arenas, areniscas cementadas por carbonato y arcillas	Abanico delta interfacies a deltaico
896 a 1307	Arenas, gravas, arcillas, intervalos esporádicos de areniscas cementadas por sílice y carbonato, trazas de Lutita Gris y Café	Abanico delta interfacies a deltaico
1310 a 1347	Gravas y arenas	Abanico delta

Tabla 4. Columna litológica actualizada del pozo I-14.

En el pozo I-14 las areniscas se encuentran a 380 m de profundidad, es decir prácticamente igual que en el pozo M-6, donde se habían detectado a 390 m antes de su actualización y reclasificación.

Con esa información y empleando estos conceptos sedimentológicos y de facies, se realizaron dos secciones esquemáticas, la primera entre los pozos I-12 y O-473 (Fig. 14) y la segunda entre los pozos I-5 y M-6 (Fig. 15). Con ellas se le dio este nuevo enfoque a la parte oeste del campo, presentando cimas litológicas más someras en los pozos citados.

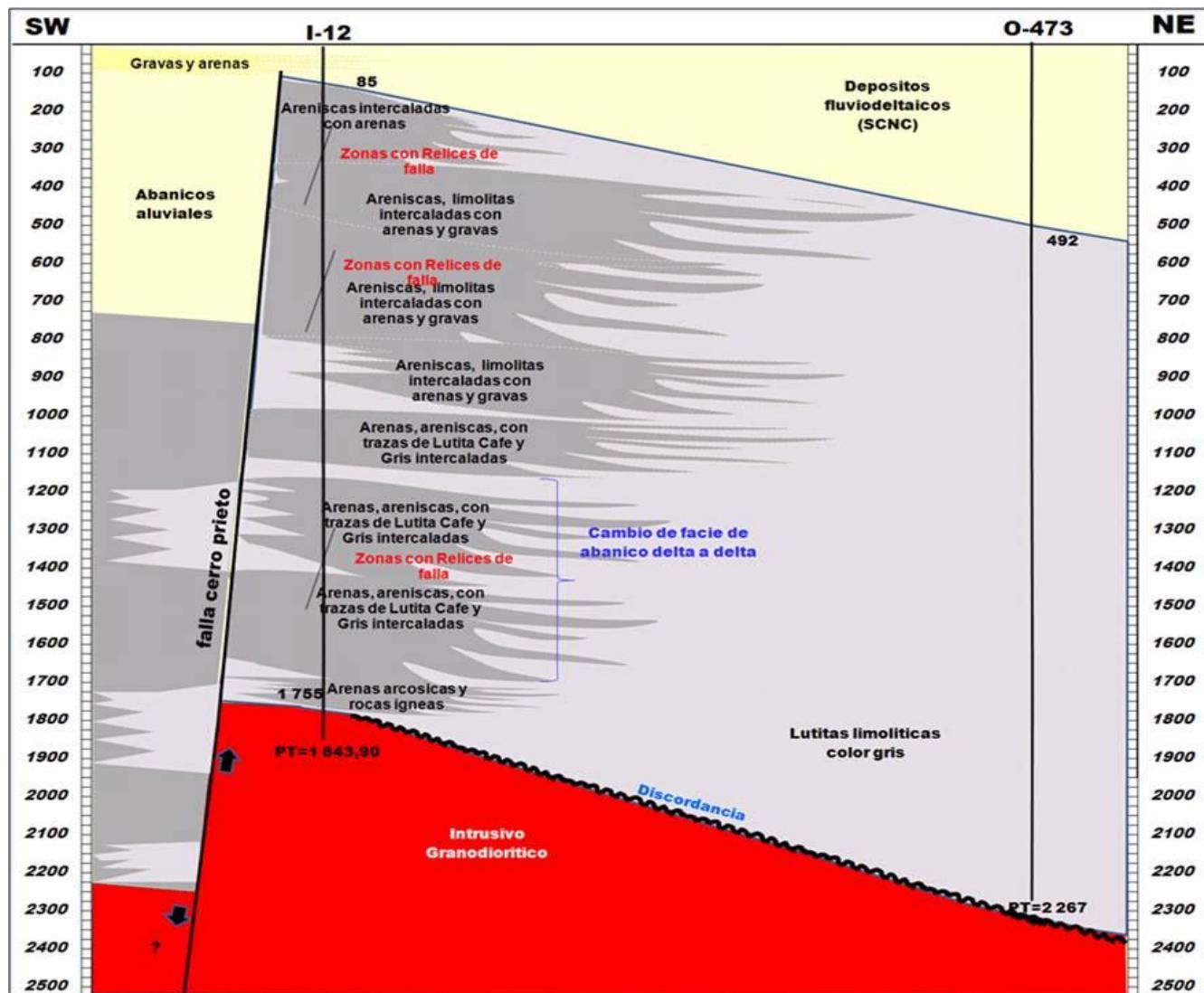


Fig. 14. Sección esquemática NE-SW entre los pozos I-5 y O-473.

En ambas figuras 14 y 15 puede notarse la relación de espesores entre la profundidad del basamento granodiorítico y la cima de la Unidad de Lutita Gris (facies deltaicas-abanico deltas).

Como producto de la interpretación realizada de este sector, se reconsideraron las cimas de las unidades deltaicas y abanico deltas (Unidad de Lutita Gris) en los pozos mencionados. Además, con el apoyo de información geofísica como la gravimetría en profundidad y sondeos eléctricos verticales, se definió que la traza superficial de la falla Cerro Prieto está más al oeste de donde Aguilar Dumas (2006) la había identificado.

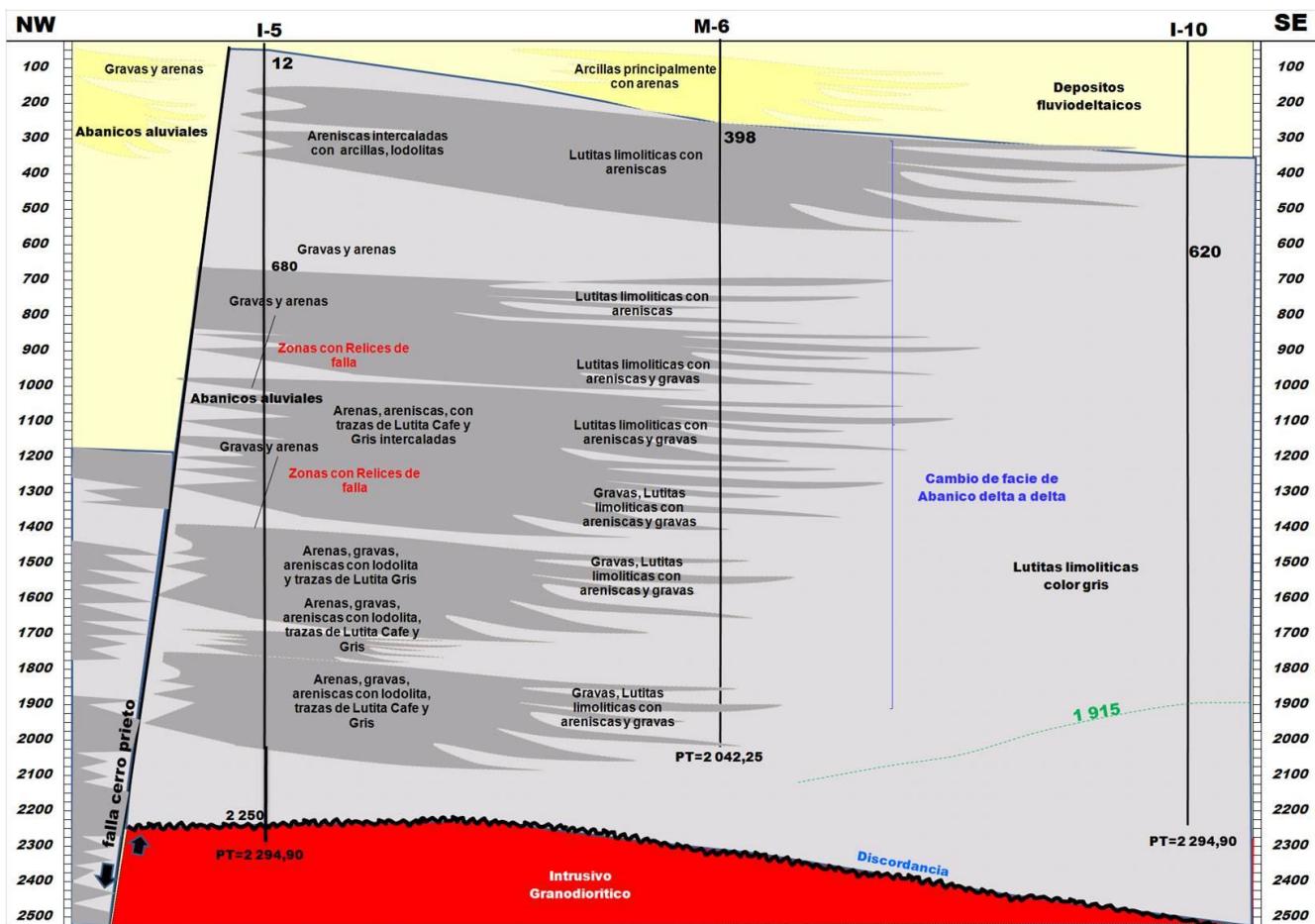


Fig. 15. Sección esquemática NW-SE entre los pozos I-5, M-6 e I-10.

Como parte complementaria y considerando que las areniscas se encontraron a profundidades someras en los pozos, se realizó una visita de campo al sector y a las inmediaciones de los pozos, observando que las areniscas afloran en diversos puntos (Fig. 16), como en las inmediaciones de la Laguna Vulcano. Las areniscas se encuentran muy intemperizadas, lo que ha provocado la pérdida de su cementante y en consecuencia su aspecto es terroso y deleznable, pudiendo ser fácilmente confundibles con arenas. Afloran como fragmentos angulosos sin arrastre (*in situ*).



Fig. 16. Aspectos de las arenas aflorantes. Izquierda: huellas de bioturbaciones. Centro: arenas conglomeráticas. Derecha: En los alrededores del volcán Cerro Prieto.

Las areniscas conservan evidencias de alteración hidrotermal, con minerales de azufre, óxidos de hierro, yeso y calcita, y mantienen estructuras del tipo de bioturbaciones y horadaciones de organismos,

lo que indica un ambiente marino costero con interfaces a delta marino (Fig. 16, izquierda). En la Figura 16 (centro) se observa una arenisca conglomerática, indicando una interfaces o cambio progradacional de continental costero a marino. Al suroeste de la laguna de evaporación se observaron montículos de estas areniscas conglomeráticas expuestas y acumuladas por maquinaria para utilizarse como banco de material (Fig. 16, centro). Pero también las areniscas afloran en los alrededores del Volcán Cerro Prieto, donde se presentan muy deleznables, de aspecto terroso, semi-compactas y parcialmente levantadas por la estructura dómica (Fig. 16, derecha).

Para la componente NO-SE del Modelo Geológico se prepararon tres secciones eléctricas con datos de sondeos transitorios electromagnéticos (TEM), de sondeos magnetotelúricos (MT) y datos gravimétricos de profundidad, complementadas con información de los pozos. En la interpretación se observó que los bloques del basamento y las formaciones sedimentarias que lo sobreyen se encuentran escalonados hacia el sureste (Fig. 17). En la Figura 18 se presenta otra de esas secciones, en la que se pueden interpretar dos semi-graben cuyas fallas límitrofes son Cerro Prieto e Imperial, ambas comportándose como fallas oblicuas.

SECCION-7
Resistividad con TEM+MT+ gravimetría (línea en rojo)

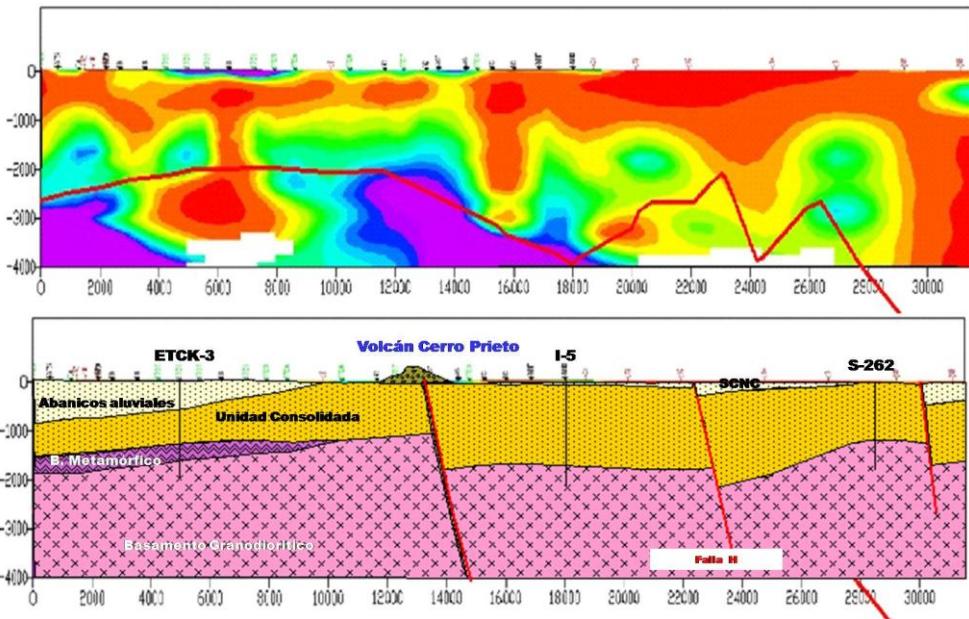


Fig. 17. Sección NW-SE, con datos resistivos, gravimétricos y de pozos. En color rosa la interpretación del basamento con información de pozos.

7. Discusión y conclusiones

La actualización del Modelo Geológico del CGCP partió de un enfoque regional para entender la tectónica local y el comportamiento estructural de las rocas y su depósito durante las etapas de extensión y transtensión, obteniéndose una columna geológica generalizada donde se incluyen los ambientes de depósito y su régimen tectónico.

La hipótesis que surge derivada de una falla de bajo ángulo (detachment) durante la etapa extensiva, explica el levantamiento estructural isostático de cuatro grandes bloques: Juárez, Cucapah, Alto Cerro Prieto e Imperial, separados por cuencas que fueron rellenadas por depósitos sin-sedimentarios que variaron de continentales a marinos.

SECCION-4

Resistividad con TEM+MT+ gravimetría (línea en rojo)

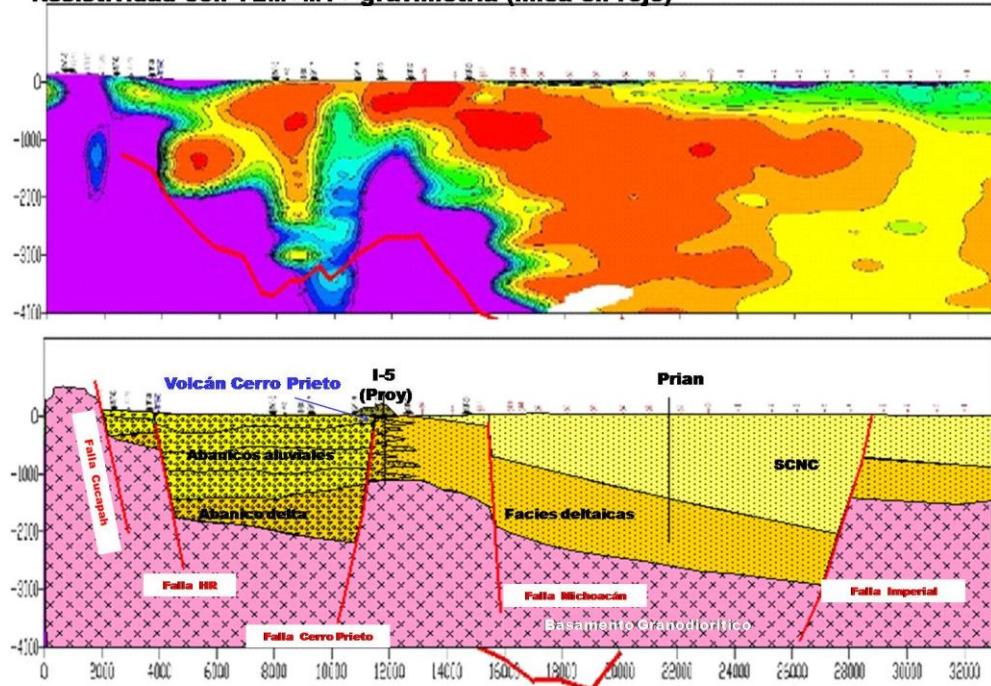


Fig. 18. Sección SW-NE con datos resistivos, gravimétricos u de pozos. En color rosa la interpretación del basamento con información de pozos.

Estructuralmente, el CGCP se encuentra dentro de un medio graben regional delimitado por las fallas Cucapah e Imperial. Con la reactivación del Alto Cerro Prieto se activó la falla del mismo nombre de manera oblicua, delimitando un subsistema tipo medio graben a nivel local, entre la Sierra Cucapah y Alto Cerro Prieto. Dentro del mismo graben regional se encuentra otro medio graben entre las fallas Michoacán e Imperial, que también se comportan como oblicuas (Fig. 19).

Las fallas Cerro Prieto e Imperial posiblemente pueden considerarse como conductoras de calor, ya que ponen en contacto intrusivos relativamente más recientes, asociados con el régimen transtensional actual. Ello podría explicar la anomalía Nuevo León, cuyos fluidos hidrotermales migran hacia el horst Cerro Prieto sirviendo como conducto las fallas H y Michoacán, respectivamente.

A partir de esta actualización del modelo se identificó otra zona de interés geotérmico, un centro de depósito ubicado entre el horst Cerro Prieto y la Sierra Cucapah, debido a que la falla Cerro Prieto actúa como oblicua y podría actuar como conductora de fluidos hidrotermales hacia la falla Cucapah, dando lugar a la llamada zona termal Calderón (Fig. 19), identificada desde tiempo atrás.

La reactivación del Alto Cerro Prieto provocó que las formaciones de ambientes deltaico y abanico deltas se encuentren aflorando en superficie, siendo estas mismas formaciones las que se encuentran en el campo geotérmico.

Se corroboró que las fallas del denominado sistema H no son de tipo lístrico y que la falla Cerro Prieto tiene una inclinación hacia el suroeste. Su traza superficial se reubicó más hacia al oeste del pozo I-5.

Referencias

Aguilar, A., 2006. Update of the Cerro Prieto Geological Model. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 30, pp. 3-7.

Alonso, H., A. González y A. Razo, 1985. Geología de los Yacimientos Geotérmicos de México. Reporte DEX 3/85, GPG, CFE. Inédito.

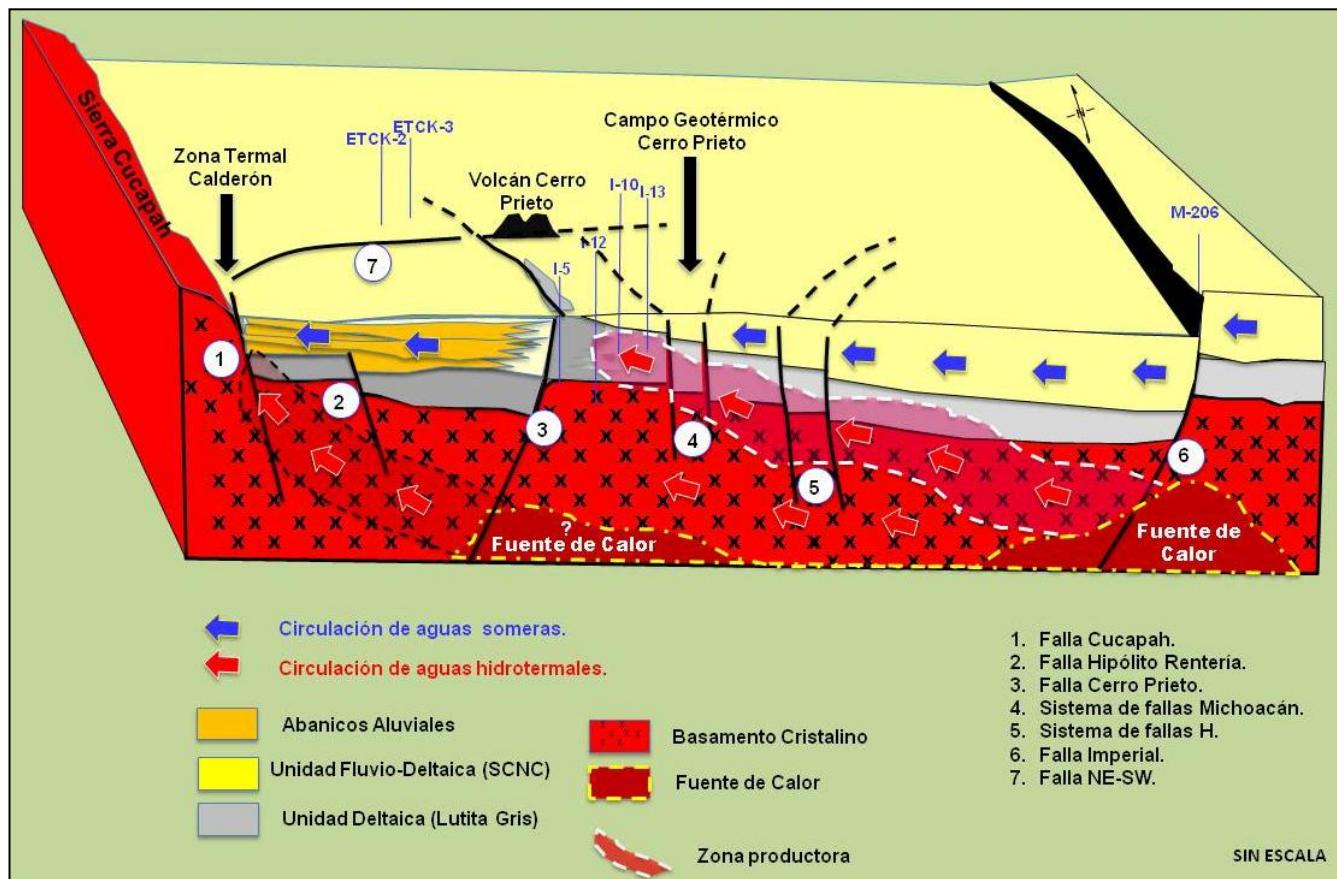


Fig. 19. Modelo geológico actualizado del campo geotérmico de Cerro Prieto y sus alrededores.

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 Cucapas, Northeastern Baja California, México, and Imperial Country. Unpublished Doctoral Dissertation, University of California. Inédito.

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*. México, pp. 91-98.

Bosence, D.W.J., 1998. Stratigraphic and sedimentological models of rift basins. In: Purser, B.H., and Bosence, D.W.J., editors, *Sedimentary and tectonic evolution of rift basins—the Red Sea–Gulf of Aden*. London (UK) 7, Chapman Hall-Kluwers, p. 9-25.

- Cobo, 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*. México, pp. 103-114.
- Cobo, 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*. México, 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 S. Vonder Haar, 1979. Microfossils from Cerro Prieto Geothermal Wells, Baja California, México. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto geothermal field*. México, pp. 162-168.
- De la Peña, L., e I. Puente, 1978. Modelo Geológico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. *Proceedings of the First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal field*. Baja California, México, pp. 17-37.
- Elders, W.A., J.R. Hoagland, and S.C. McDowell, 1978. Hydrothermal Mineral Zones in the Geothermal Reservoir of Cerro Prieto. *Proceedings of the First symposium on the Cerro Prieto geothermal field*. Baja California, México, pp. 68-75.
- Frostick, L.E., and R.J. Stell, 1993. Sedimentation in divergent plate-margin basin. *Special Publication of the International Association of Sedimentology*, **20**, pp. 111-128.
- Gastil, R.G., R.P. Phillips, and E.C. Allison, 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California. *Geological Society of America*, Mem. 140, 170 p.
- Ledesma, J., 1998. Apuntes del curso sobre cuencas extensionales. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Inédito.
- Lira, H., 2005. Actualización del modelo geológico conceptual del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C. *Geotermia*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-46.
- Lyons, D.J., and R. Van de Kamp, 1979. Subsurface geologic and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field. *Proceedings of the Second symposium on the Cerro Prieto geothermal field*. México, pp. 173-186.
- Pérez, R.F., 1996. Análisis de los mapas de potencial gravimétrico y magnético del sistema geotérmico Cerro Prieto, Baja California, México. Tesis inédita de Licenciatura en Geofísica, Universidad Autónoma de Nuevo León. Inédito.
- Quintanilla, M., 1990. Caracterización Tectónica del Campo Geotérmico de Cerro Prieto con base en el Análisis Petrológico y Magnético de Subsuelo. Tesis inédita 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, México. Unpublished Master Thesis, University of San Diego State. Inédito.