

## Procesos en el yacimiento durante 2015 con base en variables químicas y termodinámicas del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC, México

**Marco Helio Rodríguez Rodríguez y Alfredo Pérez Hernández**

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto, Residencia de Estudios, BC,

Correo: [marco.rodriguez01@fce.gob.mx](mailto:marco.rodriguez01@fce.gob.mx)

### RESUMEN

Se presentan las principales características del sistema geotérmico de Cerro Prieto que permiten comprender la respuesta del yacimiento a su explotación. Se realiza la caracterización general de los principales procesos físicos a condiciones de yacimiento que se presentaron durante el año 2015. Se utilizan variables geoquímicas y termodinámicas básicas para deducir los procesos a condiciones de yacimiento. La metodología empleada identifica los siguientes procesos: mezclado de agua geotérmica de la zona productora con agua geotérmica somera, mezclado con agua de inyección, mezclado con vapor saturado y transferencia de calor de la roca al fluido. Conocer la evolución del yacimiento permite optimizar su explotación.

*Palabras clave:* Geoquímica, isotopía, termodinámica, ingeniería de yacimientos, respuesta a la explotación.

### 1. INTRODUCCIÓN

Para optimizar la explotación de un recurso geotérmico es necesario conocer sus características esenciales. Cada sistema geotérmico es único, porque se ha formado con características locales muy particulares. Algunas características que definen a cada sistema geotérmico son sus dimensiones, profundidad, temperatura original y actual de la fuente de calor, las propiedades de la formación geológica productora y su profundidad, la temperatura y entalpía del fluido geotérmico y la composición química e isotópica de los fluidos. Estas características junto con otras cuantitativas y cualitativas de la recarga inducida por la misma explotación, definen la respuesta del yacimiento a su explotación. Por lo tanto, para optimizar la explotación y mejorar la estrategia de reinyección, es necesario conocerlas.

En este trabajo se presenta una explicación general del comportamiento del campo en el año 2015 y se determinan las zonas donde se están llevando a cabo procesos específicos, siguiendo la metodología que desde el año 2000 se ha venido aplicando al análisis e interpretación de los datos de Cerro Prieto (Pérez, 2000). Se presentan también las variables geoquímicas y termodinámicas utilizadas mediante configuraciones y gráficas para visualizar y entender fácilmente los procesos. Sin embargo, para comprender mejor el comportamiento de esas variables, primero se presentan las características generales del SGCP (sistema geotérmico de Cerro Prieto), que se considera juega un papel determinante para comprender su evolución productiva, isotópica y química.

### 2. CARACTERÍSTICAS DEL SGCP

El SGCP se formó en una zona de dispersión tectónicamente activa, entre las fallas Imperial y Cerro Prieto, separadas aproximadamente unos 13 km. Los estudios sobre la fuente de calor de este sistema indican que corresponde a una intrusión magmática emplazada hace entre 30 mil a 50 mil años, a unos 5 o 6 km de profundidad, en la zona donde se identificó la anomalía magnética Nuevo León (Elders et al., 1984). El emplazamiento del intrusivo magmático pudo haber ocurrido en la parte más frágil de la corteza, la cual puede corresponder a la zona donde el basamento es más profundo y donde se lleva a cabo el movimiento de la Placa del Pacífico que se mueve hacia el noreste a unos 5 cm/año,

separándose de la Placa Norteamericana. La falla Imperial se extiende a lo largo de 75 km, desde 3 km al sur de Brawley, en California, con una orientación N42°W (Cruz-Castillo, 2002). En el extremo sur de esta falla se presenta cierta curvatura o cambio de dirección hacia la Falla Cerro Prieto, ocasionando cierta debilidad de la corteza lo cual favorece el ascenso de intrusivos magmáticos.

La configuración del basamento granítico y la cima y base de la agrupación de minerales hidrotermales conocida como zona de sílice y epidota se presentan en la Figura 1. El basamento fue cortado por algunos pozos al oeste del campo; en la parte centro-norte de la Laguna de Evaporación el basamento se cortó a 2550 m de profundidad, y en la parte-centro sur a 1760 m. El basamento se profundiza al oriente, alcanzando profundidades cercanas a los 5,000 m, profundidad a la cual probablemente se encuentra la cima del intrusivo que actúa como fuente de calor del sistema geotérmico. Debido a que la cuenca en la que yace el SGCP es tectónicamente activa, es de esperarse que durante los últimos cientos de miles de años se hayan emplazado varios intrusivos magmáticos dentro de la corteza, formando enjambres de diques y sills. Incluso el Volcán Cerro Prieto, que corresponde a un complejo volcánico con varios eventos identificados (Macías y Rocha, 2013), es una muestra de la actividad de la zona. Pero no todo intrusivo magmático da lugar a un yacimiento geotérmico, ya que esto depende de varios otros factores, entre otros la profundidad del emplazamiento, la existencia de una roca permeable y la disponibilidad de agua de recarga.

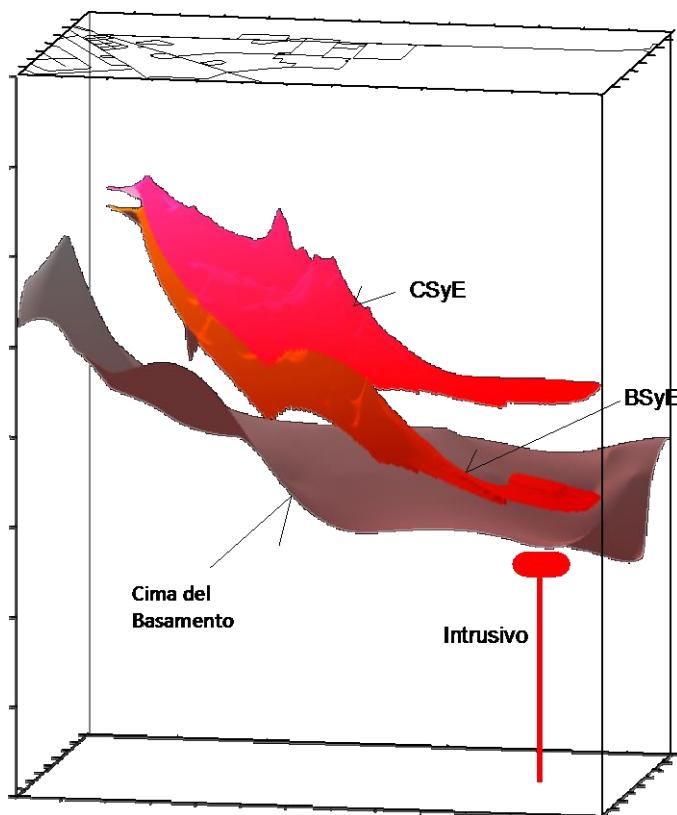


Figura 1. Configuración de la cima del basamento y de la cima (CSyE) y la base (BSyE) de los minerales de sílice y epidota en el subsuelo del campo geotérmico. Se presenta también la ubicación estimada del intrusivo que actúa como fuente de calor del SGCP.

De acuerdo con la distribución de los minerales de sílice y epidota, producto de la alteración hidrotermal, que también se muestra en la Figura 2, se puede observar que estos se profundizan hacia el oriente del campo, lo cual permite no solo identificar la forma y el tamaño del yacimiento (Elders et al., 1984),

sino también permite estimar la localización de la fuente de calor, como se indica en la misma figura. Es interesante observar que el yacimiento de Cerro Prieto corresponde a una pluma térmica, en la que predomina un flujo lateral, seguramente favorecido por el hecho de que la roca almacenadora es sedimentaria y con una permeabilidad primaria horizontal 10 veces mayor que la permeabilidad vertical.

Uno de los parámetros más importante en un sistema geotérmico es la temperatura, por lo que su distribución, al igual que la de los minerales de sílice y epidota, define la forma y el tamaño del sistema. Siguiendo el patrón de la anomalía térmica que se define a profundidad, se puede confirmar la localización de la fuente de calor. En la Figura 2 se presenta la distribución de las temperaturas de pre-explotación del sistema, de los 500 m a los 4000 m de profundidad, a intervalos a cada 500 m, sugiriéndose también la ubicación de la fuente de calor. La distribución de temperaturas de la Figura 2 sigue un patrón muy similar al definido por los minerales hidrotermales de sílice y epidota de la Figura 1, coincidiendo en ambos casos la localización de la fuente de calor.

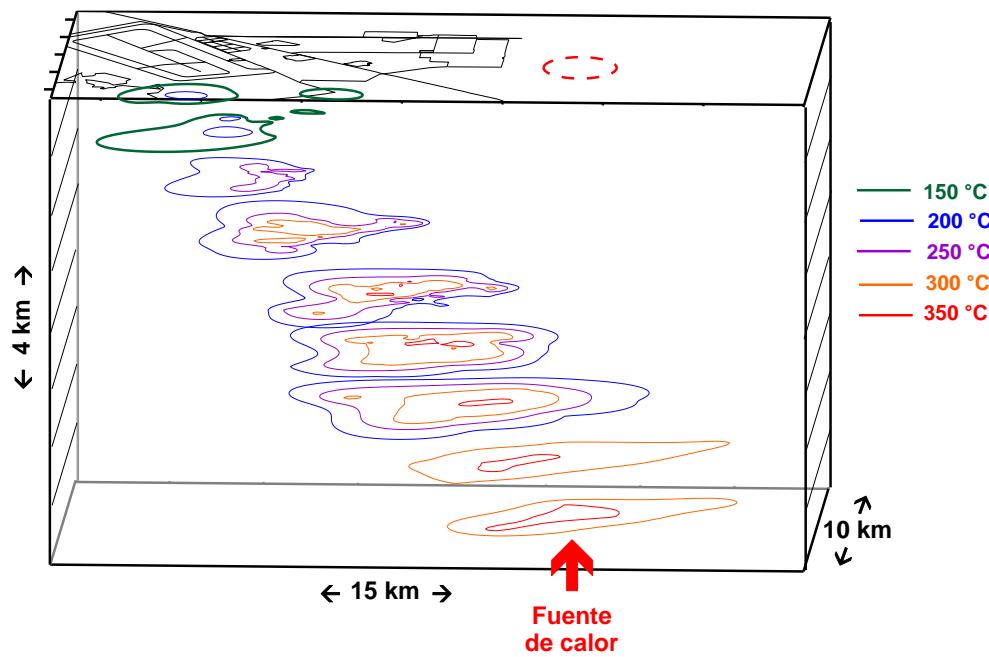


Figura 2. Configuración de la anomalía térmica del SGCP, a intervalos de profundidad de 500 m.

Se ha estimado que la corteza tiene un espesor de unos 20 km en el subsuelo del campo geotérmico Cerro Prieto (Elders et al., 1984). La profundidad del intrusivo responsable del calor del SGCP se estima en 5 km, y su temperatura original depende del tipo de magma y pudo variar entre 850°C a 1100 °C. Sin embargo, la temperatura actual de ese intrusivo debe de ser considerablemente menor, debido a que a lo largo del tiempo se ha sido enfriado al transferir su calor a la roca encajonante, saturada de agua. Cuando el fluido toma el calor transferido de la fuente de calor, aumenta su temperatura y su volumen específico, por lo que se expande y fluye a zonas más someras, de menor presión, formando una pluma térmica y a través de celdas convectivas que fluyen en la Unidad de Lutita Gris. Esta es la roca almacenadora y está constituida por intercalaciones lenticulares de areniscas y lutitas. Para formar esa anomalía térmica fue necesario que el agua circulara por decenas de miles de años, según se ha observado en simulaciones numéricas.

El agua que llegó a la fuente de calor se mezcló con fluidos magmática y tendió a fluir hacia la superficie, de manera predominantemente horizontal (lateral out-flow). Se fue mezclando también con aguas de menor temperatura provenientes de diferentes acuíferos menos profundos, que interactuaron con los

fluidos calientes y alteraron tanto su temperatura como su composición química e isotópica original. Esos fluidos ascendentes han estado circulando durante varias decenas de miles de años a través de los estratos permeables y porosos, dando lugar así al yacimiento geotérmico, el cual había permanecido relativamente aislado de la superficie y de otros acuíferos someros por la presencia de una capa sello. En su mayor parte, esta capa está constituida por una unidad de lutitas café sin areniscas, de muy baja permeabilidad, pero en otras partes está conformada por procesos de auto-sellamiento provocados por el depósito de minerales hidrotermales, producto de la alteración de las rocas originales.

Es importante señalar que el yacimiento geotérmico es parte del SGCP, pero no todas las porciones del SGCP constituyen un yacimiento, ni todos los sistemas geotérmicos presentan condiciones favorables para formar un yacimiento geotérmico, ya que estas dependen también de varios factores geohidrológicos.

También se considera importante recordar que el SGCP es un sistema geotérmico de tipo hidrotermal, que incluye fluidos naturales calientes, similar al 95% de los sistemas geotérmicos que contienen yacimientos geotérmicos actualmente en explotación en todo el mundo. Son yacimientos considerados convencionales, mientras el otro 5% está formado por yacimientos de roca seca caliente, que ya empiezan a ser comercialmente explotados mediante sistemas geotérmicos mejorados.

Una de las características del yacimiento de Cerro Prieto con un papel determinante en su respuesta a la explotación, es su enorme profundidad y el hecho de estar en una cuenca saturada predominantemente con agua de baja temperatura que presenta comunicación hidráulica con los estratos productores de alta temperatura. La explotación del yacimiento provoca una caída de presión de los estratos productores, los cuales inducen una recarga de los estratos circunvecinos, tanto los someros de baja temperatura como los calientes localizados a mayor profundidad. Sin embargo, debido a la mayor densidad de los fluidos fríos de acuíferos que sobreyacen a los estratos productores, hay un mayor aporte de esos fluidos fríos con respecto a los fluidos calientes de mayor profundidad. Es más fácil que fluidos fríos desciendan a que fluidos calientes asciendan hacia los estratos productores despresurizados, lo que en conjunto produce una menor temperatura media del yacimiento.

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUIDOS DEL YACIMIENTO

Para detectar y entender los procesos del yacimiento, es necesario tener en cuenta el origen y las características termodinámicas y químicas generales de los principales fluidos que interactúan en el yacimiento. El agua geotérmica ‘original’ de la zona productora puede interactuar con: a) agua geotérmica somera, la cual proviene de estratos someros con respecto a la zona productora, que no deben confundirse con acuíferos someros; b) agua geotérmica profunda, la cual proviene de estratos profundos cercanos a la fuente de calor; c) agua de inyección, es decir agua de la Laguna de Evaporación que ha sido sometida a evaporación solar; y d) vapor saturado, generado en las zonas productoras del propio yacimiento. En la Tabla 1 se resumen las principales características termodinámicas, químicas e isotópicas de los fluidos descritos anteriormente (Truesdell et al., 1981; Lippmann et al., 1991).

Para este trabajo, las variables involucradas son la concentración del ion cloruro, la entalpía de producción de cada pozo y la composición de los isótopos estables del agua, que son el oxígeno-18 y el deuterio. Los datos de isotopía son los valores a descarga total reportados como resultado del muestreo y análisis de los fluidos de los pozos productores e inyectores, realizados por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) durante el 2015 (Portugal, 2015). Los datos de las concentraciones a condiciones atmosféricas de los iones sodio, potasio, calcio y cloruros utilizados en este trabajo, corresponden al promedio anual de valores para cada pozo.

*Tabla 1. Rangos aproximados de las principales características isotópicas (oxígeno-18 y deuterio), químicas (ión cloruro) y termodinámicas (temperatura, entalpía) de los fluidos del sistema geotérmico de Cerro Prieto.*

	OXÍGENO-18 permil (‰)		DEUTERIO permil (‰)		CLORUROS (ppm)		ENTALPÍA (kJ/kg)		TEMPERATURA (°C)	
GEOTÉRMICA ORIGINAL	-6.5	-9.5	-92	-98	8000	12000	1150	1650	260	350
GEOTÉRMICA SOMERA	-12.5	-14.5	-98	-110	2000	4000	500	950	125	225
GEOTÉRMICA PROFUNDA	-4.5	-3.5	-93	-81	14000	16000	1750	2100	360	375
AGUA DE INYECCIÓN	-2	+ 5	-60	-20	>20000		850	1100	25	200
VAPOR SATURADO					0		2550	2800	350	250

Los datos utilizados para la entalpia son los valores de entalpia de producción de cada pozo, correspondiente a la fecha más próxima al muestreo químico. En las siguientes secciones se hace una breve descripción de las variables utilizadas y se mencionan las características de los principales fluidos en el yacimiento; después se muestran las gráficas tipo para la configuración de estas variables y se hace un análisis general de ellas. Posteriormente se muestran las gráficas que relacionan entre si las variables cloruros y entalpía, mismas que se interpretan y se complementan con configuraciones para definir las áreas específicas donde ocurren procesos adicionales. Finalmente, se presenta un mapa para visualizar las zonas donde se desarrollan los diferentes procesos, a fin de ofrecer una visión integral del comportamiento general del yacimiento durante el año 2015.

#### 4. COMPOSICIÓN ISOTÓPICA

Las unidades utilizadas en isotopía son los permilitajes (‰) de la diferencia de relaciones isotópicas con respecto al estándar mundial SMOW, llamadas unidades delta ( $\delta$ ). Para los isotopos estables del agua las unidades delta son:  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) para el oxígeno y  $\delta\text{D}$  (‰) para el hidrogeno. Para simplificar en el texto y en las gráficas se indicaran las unidades delta simplemente como ‘oxígeno-18’ y ‘deuterio’. Los datos isotópicos utilizados son a condiciones de descarga total, es decir el contenido isotópico que tiene el flujo total.

Los contenidos de oxígeno-18 y deuterio se han utilizado desde hace tiempo como trazadores naturales; las configuraciones de dichas variables son útiles para visualizar las zonas del campo en donde existan dos procesos de mezclado: a) mezclado del fluido geotérmico original con agua geotérmica somera, y b) mezclado de fluido geotérmico original con agua de inyección.

##### 4.1 OXÍGENO-18: MEZCLADO CON AGUA GEOTÉRMICA SOMERA

En la Figura 3 se presenta la configuración isotópica de oxígeno-18 del año 2015, donde se presentan las regiones del yacimiento que tienen valores iguales o menores a -9.5 así como las zonas en donde hay pozos con valores iguales o mayores a -8. Los valores menores a -9.5 indican mezclado con agua geotérmica somera. En 2015 se presentan 4 zonas con valores menores a -9.5 en Oxígeno-18. La región más grande presenta una orientación NE-SW atravesando en diagonal el campo, y abarca desde el SW de CP1 hasta el centro del campo. La segunda región es casi una continuación de la primera zona y se presenta en el límite entre la parte oriental de CP3 y CP4. La tercera zona está al SE de CP4

y la cuarta zona está localizada al S de CP2 y corresponde a la zona de influencia de agua de recarga somera proveniente del sur del campo.

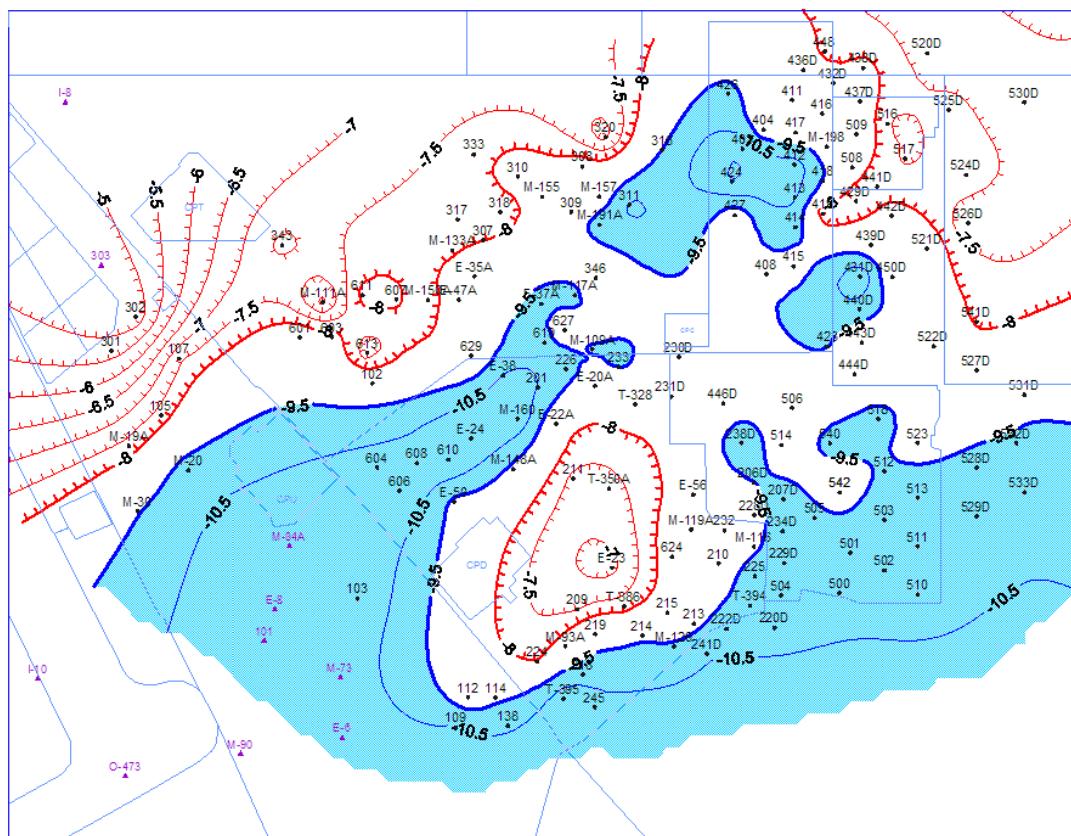


Figura 3. Concentraciones del isótopo oxígeno-18 en 2015.

Las isolíneas de valores de oxígeno-18 iguales o mayores a -8.0 representan zonas que pueden estar sujetas a alguno de los procesos siguientes: proceso de mezclado con agua de inyección, zonas con recarga profunda (agua líquida que tiene mayor contenido de oxígeno-18 debido a un mayor intercambio isotópico con la roca) o procesos de concentración de oxígeno-18 asociados a procesos de ebullición y condensación (separación de fases).

En la Figura 3 se distinguen claramente tres zonas con valores altos: en el centro de CP2, al N de CP1 y al NE de CP4. En las dos primeras el alto valor en oxígeno-18 se puede explicar por el proceso de mezclado del agua geotérmica original del yacimiento con agua de inyección. La localizada en CP4 se puede asociar con un frente de agua geotérmica profunda proveniente del NE del yacimiento. Otra posibilidad es que estos pozos tengan una menor proporción de mezclado con agua geotérmica somera.

#### 4.2 DEUTERIO: MEZCLADO CON AGUA DE INYECCIÓN

La Figura 4 muestra la configuración del deuterio, notándose las regiones con valores iguales y mayores a -90 y -92 y las líneas con valores menores a -98. Los pozos con valores iguales o mayores a -92, se consideran en general como pozos que han sufrido un mezclado de agua geotérmica original con agua de inyección. Los pozos con valores menores a -98 se considera que presentan, en general, mezclado con agua geotérmica somera. Adicionalmente a las líneas de valores de -92, se muestra el

contorno de valores mayores de -94, con la finalidad de observar la tendencia en la dirección de los flujos de los frentes de inyección.

En la Figura 4 también se observan claramente las dos zonas de pozos productores influenciados por el agua de inyección: una, localizado al W y centro de CP2, provocada por el flujo de agua de pozos inyectores como el E-6 y otros de la zona hacia el yacimiento. El otro frente, al N de CP1 y W de CP3, con evidencia de mezclado de agua geotérmica del yacimiento con el flujo de agua de inyección proveniente del pozo 303 y otros localizados en la Laguna de Evaporación. Además de las líneas -85, -90 y -92 se muestra la isolínea de valores de deuterio menores a -94, con la finalidad de observar tendencias en la dirección de los frentes de inyección.

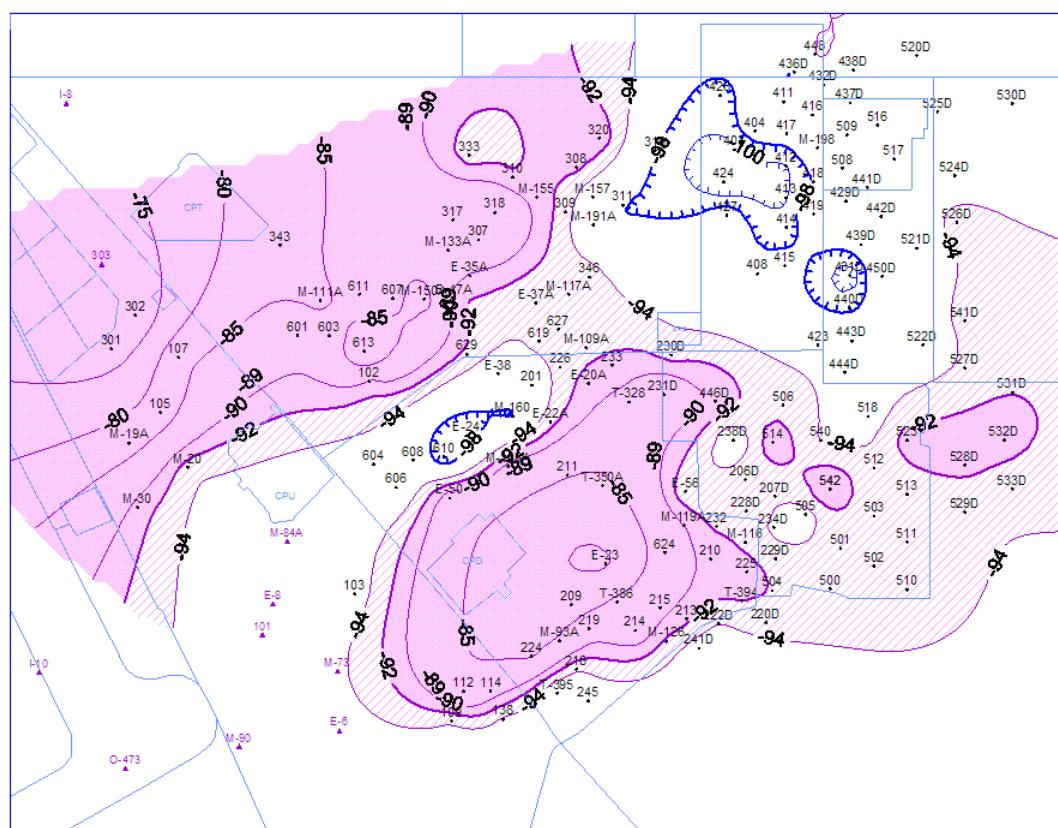


Figura 4. Concentraciones del isótopo deuterio en 2015.

Hacia el SE de CP2 y hacia el límite E del campo se detectan valores de deuterio mayores a -92. En los pozos en que esto ocurre, existe la posibilidad que se trate de pozos con influencia de agua geotérmica profunda, pero lo más probable es que se trate de pozos con influencia de agua de inyección pues además de que están en la ruta del avance del flujo del agua de inyección, algunos son pozos profundos y al estar a mayor profundidad hay más probabilidad de que extraigan agua de inyección, la cual es más densa que el agua geotérmica de estratos superiores.

Por otra parte, en la Figura 4 se observan varias zonas con valores de deuterio menor o igual a -98: la de mayor extensión abarca el E de CP3 y NW de CP4, con otras dos más pequeñas, una en CP4 y otra en CP2. Se considera que los valores de deuterio iguales o menores a -98 son debido al mezclado del agua geotérmica original con agua geotérmica de estratos más someros que la zona productora.

## **5. CLORUROS**

En la Figura 5 se presenta la configuración de la concentración del ion cloruro a condiciones de yacimiento (Truesdell et al., 1989). Los valores límite de las isolíneas que se utilizaron para visualizar las zonas del campo son iguales o menores a 8000 ppm y valores iguales o mayores a 10,000 ppm. En general, las concentraciones entre 8000 y 10000 ppm corresponden a pozos que presentan poco mezclado y por tanto son ‘normales’ con respecto a los valores de las concentraciones detectadas en los inicios de la explotación del yacimiento.

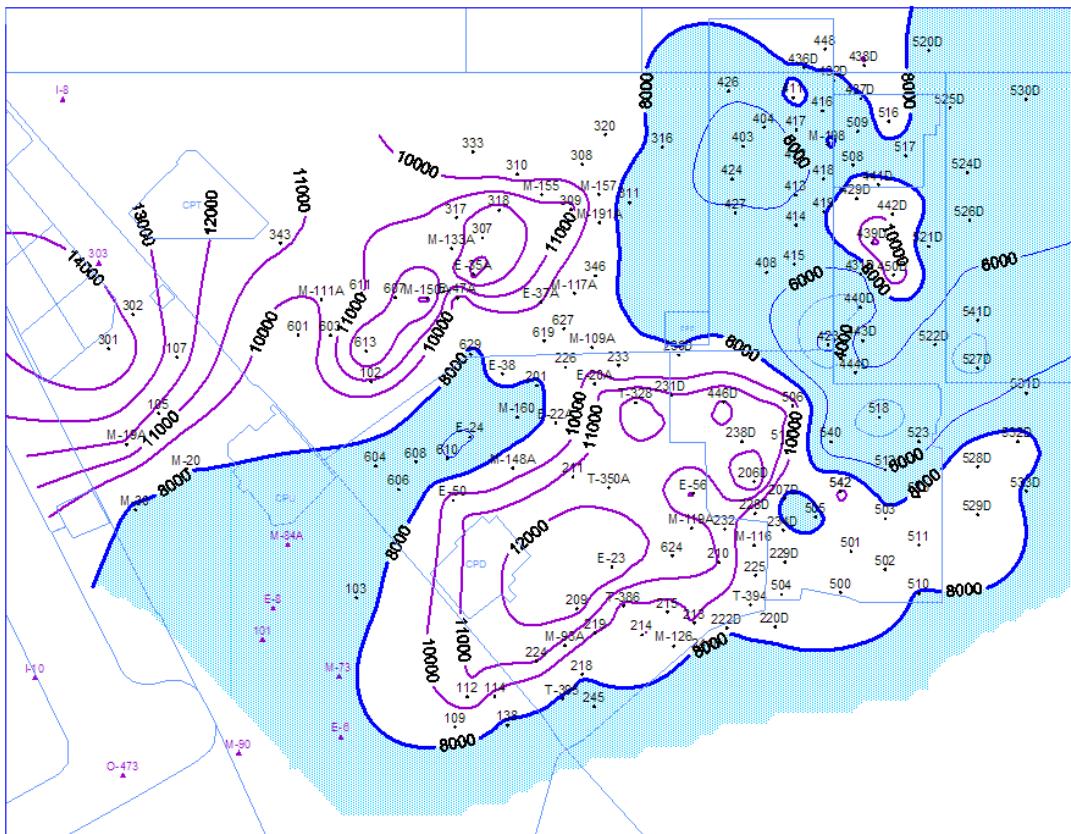


Figura 5. Distribución de la concentración de cloruros [en ppm] en 2015.

Se observan varias zonas: tres con valores iguales o menores a 8000 y tres con valores iguales o mayores a 10000 ppm. Las zonas con valores menores a 8000 ppm corresponden a grandes zonas de dilución resultado del mezclado de agua geotérmica ‘original’ con agua geotérmica somera. Un frente de dilución con agua geotérmica somera abarca una diagonal que va del centro-oriente de CP1 al centro del campo. Otro frente de bajos cloruros se localiza al NE del campo y abarca la mayor parte de CP4 y el NE de CP3. Otra zona se localiza en el límite S de CP2. Esta zona ha retrocedido su avance en 2015, al igual que en años anteriores, debido a la presencia de pozos con fluidos con valores de ion cloruro mayores a 9000 ppm, producto del avance del agua de inyección.

Existen dos zonas que tienen valores de cloruros mayores de 10,000 ppm. Una está ubicada al centro de CP2 en una diagonal con dirección NE-SW. En el SE de CP2 se observa que a diferencia de hace varios años, cuando había concentraciones de cloruros en el rango de 6000 a 8000 ppm, en 2015 hay ya concentraciones entre 8000 y 10,000 ppm, aumento que se relaciona directamente con un avance

del frente de agua de inyección. La otra zona con altos cloruros se localiza al N de CP1 y en el centro-N de CP3. Debido a la dinámica actual del avance de los frentes de inyección, se considerara que un pozo estará influenciado por los frentes de inyección cuando tenga concentraciones de cloruros mayores de 10,000 ppm.

Adicionalmente a las isolíneas de 10,000 ppm se presenta la de 9000 ppm con el fin de auxiliar en la detección de tendencias. Se observa que la zona de altos cloruros en el N del campo presenta una tendencia con dirección hacia el centro y NE de CP3. En la zona de altos cloruros en CP2, el avance de este frente tiene dirección NE-SW, avanzando hacia el sur de CP4 y también se tiene un aumento de la concentración de cloruros en la dirección SE de CP2. Adicionalmente, existe una pequeña zona en el límite centro-oriental de CP4 que tiene valores de cloruros mayores a 10,000 ppm. Posiblemente, esta zona es de pozos con un menor mezclado con agua geotérmica somera, o cuyo fluido está presentando ebullición local.

En general, existen tres posibles causas de valores altos en cloruros: zonas que estén siendo influenciadas por agua de inyección, zonas en las que los pozos estén extrayendo agua concentrada en cloruros por estar o haber estado en ebullición, o zonas que estén recibiendo recarga geotérmica profunda. Utilizando las variables de isotopía (configuraciones de las figuras 3 y 4), la entalpia y la concentración del ion cloruro se puede deducir cuál es el proceso específico que se está llevando a cabo, como se explica más adelante.

## 6. ENTALPIA

En la Figura 6 se muestra la configuración de la entalpía específica de la mezcla en kJ/kg de los pozos integrados. Se observa que el área con menor entalpía (<1400 kJ/kg), esté al oeste del campo, abarcando toda el área de CP1 y el W de CP2 y CP3, además del S de CP2, es decir prácticamente la mitad del campo. Estas zonas han sido explotadas durante un mayor tiempo, presentan la menor temperatura de yacimiento y están en fase líquida. Por otra parte, se presenta una zona bien definida con alta entalpía (>2000 kJ/kg) en una diagonal que va desde el centro-oriental de CP2 al centro-oriental de CP4. Los pozos con alta entalpía están a dos fases en el fondo del pozo y seguramente también en el yacimiento, lo cual puede indicar alguno de los siguientes procesos: aumento o ganancia de entalpía sin modificación de la concentración total, concentración por ebullición con presencia de dos fases en el yacimiento y dilución con vapor por mezclado de agua geotérmica con vapor saturado.

En general, los procesos de ebullición generalizada en el yacimiento y el de mezclado con vapor tienen efectos contrarios en la concentración del ion cloruro de la salmuera obtenida en superficie: el proceso de ebullición genera altas concentraciones de cloruros y el proceso de mezclado con vapor produce bajas concentraciones. Para definir cuál de los dos procesos tiene lugar, un método práctico es combinar de manera gráfica la variable entalpía total de la mezcla con la variable química de la concentración del ion cloruro, calculado a condiciones de yacimiento, como se presenta más adelante.

## 7. GRÁFICA OXÍGENO 18 - DEUTERIO

Los valores isotópicos del agua geotérmica de Cerro Prieto están en un *rango amplio* (Tabla 1), a diferencia de otros campos donde se presentan valores en rangos mucho menores, por lo que los procesos de mezclado tienen una trayectoria inclinada respecto a la línea del agua meteórica, y no horizontal como en otros yacimientos geotérmicos. Debido a ello, al utilizar la gráfica oxígeno-18 vs deuterio se complica la detección y análisis de los procesos que están ocurriendo en el yacimiento. En general, para el SGCP se ha determinado que los fluidos de los pozos que tienen valores cercanos y

mayores a -92 en deuterio están influenciados por agua de inyección, mientras que aquellos que presenten valores de oxígeno-18 cercanos y menores a -9,5 son pozos que están influenciados por la recarga de agua geotérmica somera.

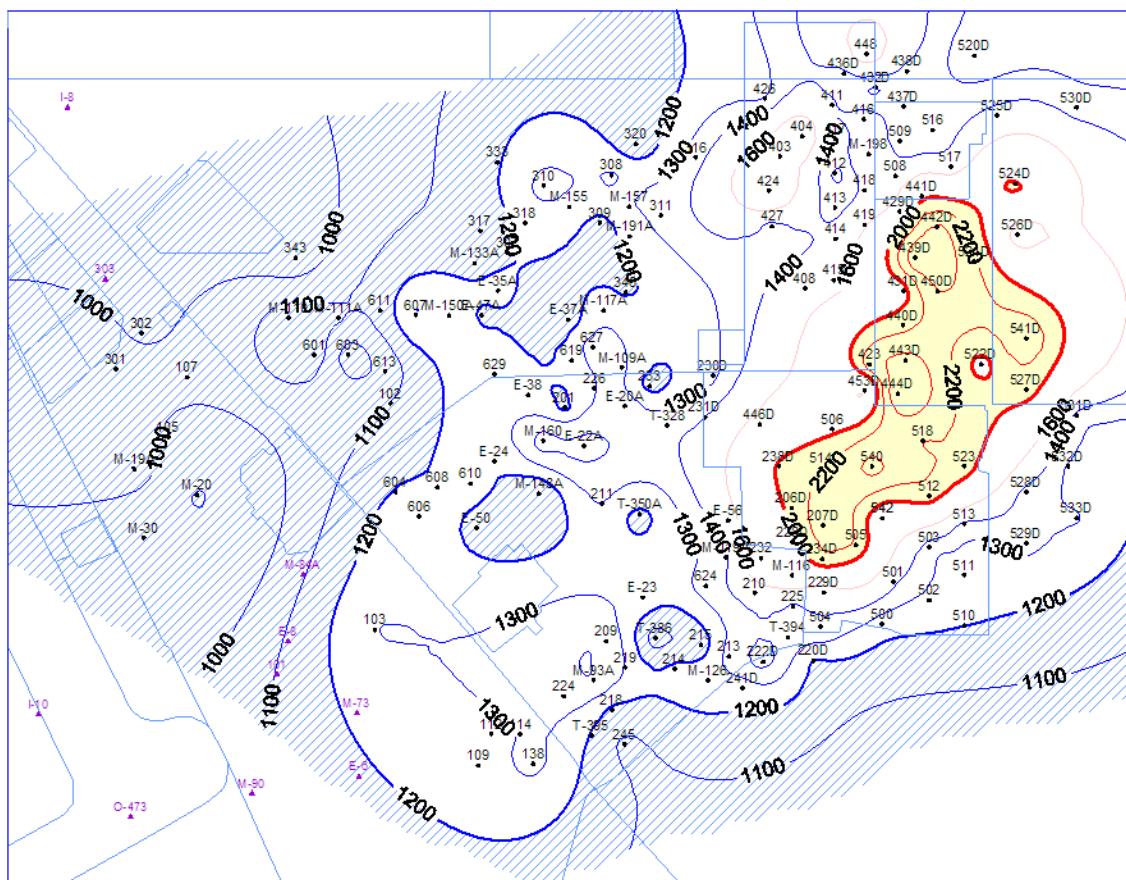


Figura 6. Entalpía promedio de producción [kJ/kg] en 2015.

En la Figura 7 se presentan la gráfica del oxígeno-18 contra deuterio, con los valores isotópicos calculados a descarga total (mezcla). En esa figura se muestra el rango de composiciones isotópicas aproximadas del agua geotérmica somera, del agua de inyección, de la recarga profunda, del agua geotérmica original y las zonas de mezclado. Como se puede apreciar, hay una diversidad de valores, muchos de los cuales tienden hacia valores del agua geotérmica somera, otros hacia valores del agua de inyección y otros más caen en el rango de valores típicos del agua geotérmica original o de poca dilución.

Con base en la composición isotópica de los pozos productores en 2015, se puede afirmar que el proceso dominante para la gran mayoría de los pozos del campo, es un mezclado de agua geotérmica original con agua geotérmica somera y un mezclado de agua geotérmica original con agua de reinyección. Pero para identificar otros procesos, es necesario involucrar otras variables.

## 8. CLORUROS vs ENTALPÍA

Para detectar procesos físicos en el yacimiento se graficó la concentración de los cloruros calculados a condiciones de yacimiento contra los valores de entalpía obtenidos para el año 2015, como se mues-

tra en la Figura 8. En esta figura, mediante áreas y flechas se señalan las características de los principales procesos y su dirección. Mientras mayor sea la diferencia entre los valores actuales reales y el valor teórico que deberían tener si no hubiese afectaciones por algún proceso, mejor se detectará el proceso en cuestión.

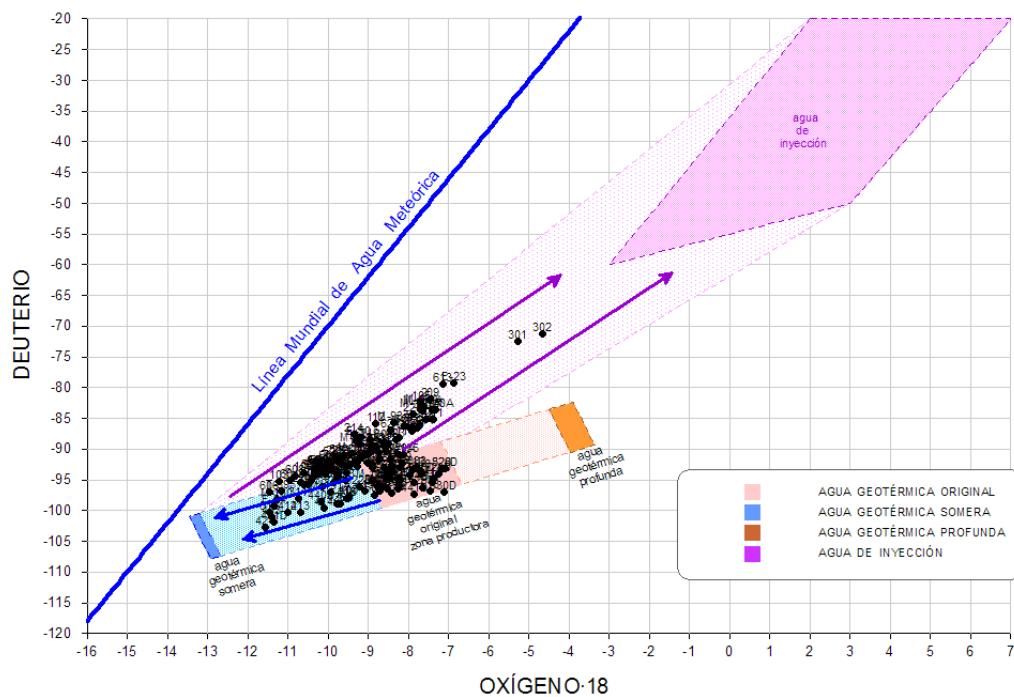


Figura 7. Composición isotópica oxígeno-18 vs deuterio, en 2015.

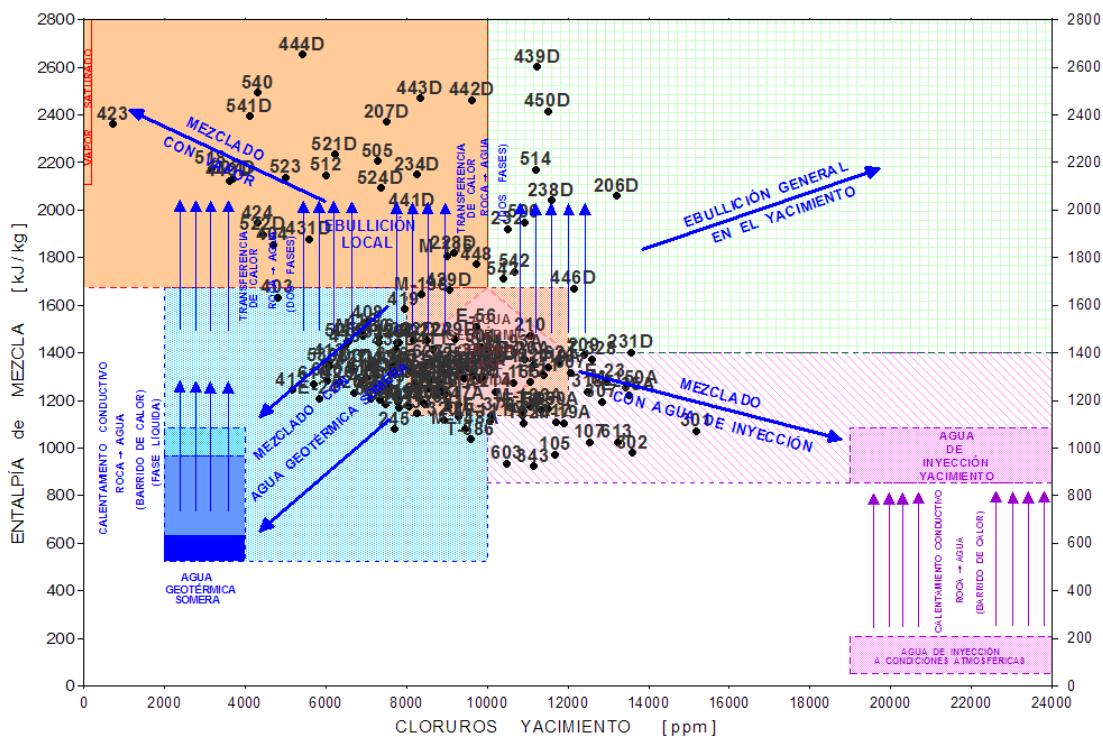


Figura 8. Diagrama de concentración de cloruros a condiciones del yacimiento contra la entalpía de producción del fluido de los pozos productores, indicando las áreas de los diferentes procesos identificados.

En el diagrama de cloruros contra entalpía de la Figura 8, se puede observar que los valores de los pozos productores no se alinean directamente entre las características del agua inyectada y del agua somera, que tienen entalpías muy bajas. Para el caso del agua de inyección en frío, que se inyecta a temperatura ambiente, la entalpía no es mayor de 200 kJ/kg, mientras que la del agua geotérmica somera no alcanza los 900 kJ/kg. Los pozos productores que reciben recarga de inyección o agua somera no se ven tan afectados productivamente, ya que la recarga de baja temperatura fue tomando el calor de la roca conforme se fue desplazando hacia los pozos productores, y llega a ellos con una temperatura mayor a la que tenía al ingresar al yacimiento. A ese proceso de ganancia de calor del fluido se le denomina barrido de calor (Grant, et al., 1981), el cual es benéfico para el sostenimiento de la producción del campo.

Los procesos denominados de mezcla con vapor condensado y mezcla con salmuera residual del yacimiento se presentan en pozos con alta entalpía. Cuando la presión en el yacimiento disminuye por debajo de la presión de saturación a la temperatura del fluido, se alcanzan condiciones de evaporación del fluido y se desarrollan zonas de dos fases y de segregación en el yacimiento, provocando que los pozos produzcan dos fases con diferente fracción de vapor.

Si un pozo productor está terminado en una zona de vapor dominante, su fracción de vapor será muy elevada, al igual que su entalpía de producción. Cuando un pozo es alimentado solamente con vapor a temperaturas de 300°C, su entalpía es de 2750 kJ/kg. Conforme ese vapor es transportado hacia la superficie dentro del pozo, su presión va disminuyendo. Pero la entalpía del vapor a temperaturas menores, por ejemplo a 240°C, es de 2804 kJ/kg. Por lo tanto, para mantener el balance de energía, parte de ese vapor se condensa. Al haber condensación de vapor, el líquido condensado presenta un mínimo contenido de cloruros, lo cual diluye cualquier producción de salmuera que pueda acompañar a la fase de vapor. Con ello se pueden tener pozos con baja concentración de cloruros pero con alta entalpía.

Por otro lado, al ocurrir ebullición en el yacimiento la fase líquida residual de esa ebullición se enriquece en cloruros, y por la segregación de fases el líquido tiende a desplazarse a zonas de mayor profundidad por su mayor densidad. Cuando esa agua enriquecida en cloruros arriba a la zona de un pozo productor, se puede observar un enriquecimiento de cloruros aunque la entalpía del pozo sea alta (Truesdell et al., 1992).

## 9. RESUMEN GRÁFICO DE LOS PROCESOS

La configuración de los principales procesos dominantes en el yacimiento de Cerro Prieto en el año 2015 se presenta en el mapa de la Figura 9. Esos procesos son mezclado con agua geotérmica somera, mezclado con agua de inyección y mezclado con vapor condensado. En este mapa se pueden apreciar claramente los límites actuales de los frentes y la variación en el comportamiento físico y geoquímico del yacimiento de Cerro Prieto en respuesta a la explotación.

## 10. CONCLUSIONES

El SGCP se caracteriza por haberse desarrollado en una cuenca sedimentaria saturada de agua, con estratos productores profundos de 1000 m a 4000 m de profundidad. La respuesta dominante a la explotación ha sido la invasión de aguas circunvecinas de menor temperatura. En este campo, el efecto de una recarga artificial no es tan benéfica como en sistemas que presentan recargas escasas o limitadas.

Los principales procesos identificados en el yacimiento, con base en el análisis de las variables químicas y termodinámicas durante el año 2015 fueron los siguientes:

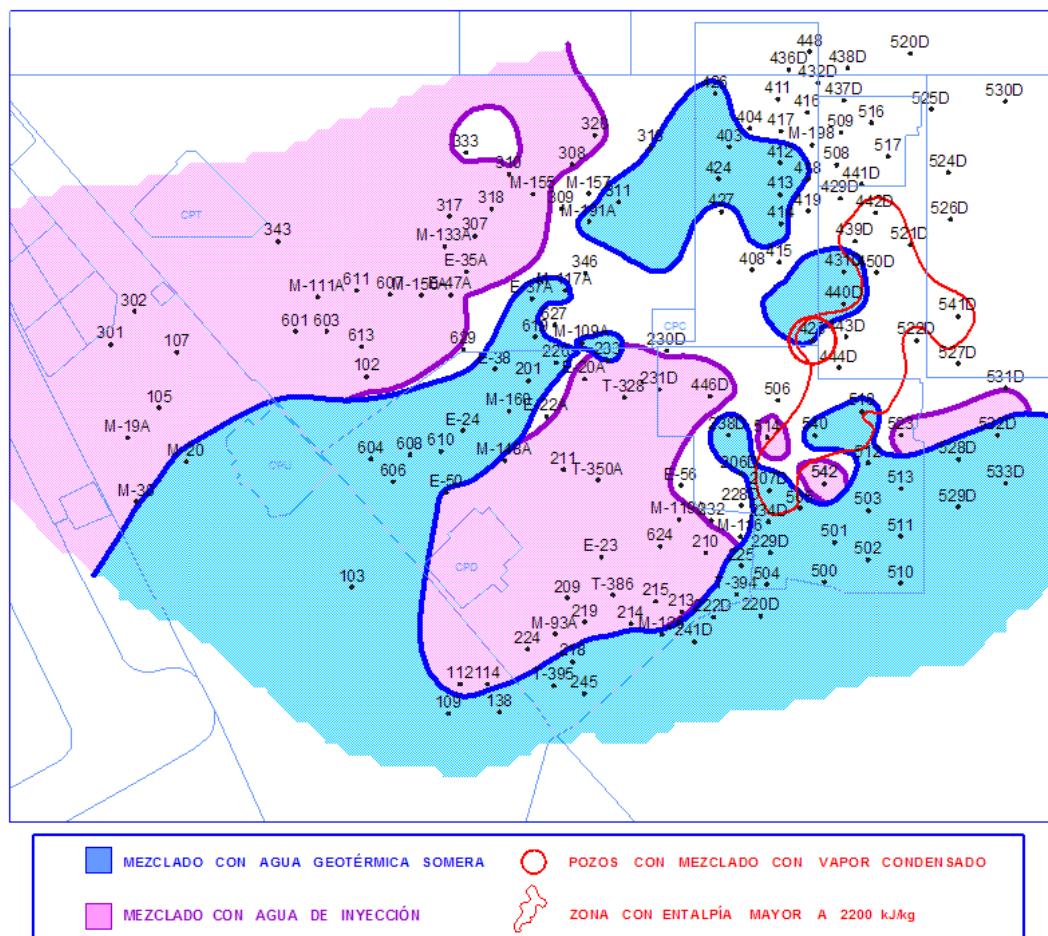


Figura 9. Mapa con los principales procesos dominantes identificados en el SGCP durante el año 2015.

- Mezclado de agua geotérmica original con agua geotérmica somera.
- Mezclado de agua geotérmica original con agua de inyección.
- Mezclado de agua geotérmica original con vapor saturado.
- Transferencia de calor roca → agua.

Entre ellos, los procesos dominantes en el campo son la recarga de aguas de baja temperatura, principalmente de agua geotérmica somera, lo cual ha ocasionado una gran sustentabilidad en la producción de vapor del campo, así como una disminución general de la entalpía de producción.

## REFERENCIAS

- Cruz-Castillo, M., 2002. Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. GEOS, Boletín de la Unión Geofísica Mexicana, pp. 37-42.
- Elders, W.A., Bird, D.K., Williams, A.E. and Schiffman, P., 1984. Hydrothermal flow regime and magmatic heat source of the Cerro Prieto geothermal system, Baja California, Mexico, Geothermics, 13.

Macías-Vázquez, J.L., y Rocha López, V.S., 2013. Evolución vulcanológica del Volcán Cerro Prieto, B.C. *Geotermia*, Vol. 26, No.1.

Lippmann, M.J., Truesdell, A.H., Halfman-Dolley, S.E., and Mañón, M.A., 1991. A review of the hydrologic-geochemical model for Cerro Prieto. *Geothermics*, 20, pp. 39-52.

Pérez Hernández, A., 2000. Caracterización de los procesos en el yacimiento utilizando variables geoquímicas y termodinámicas básicas (Aplicado a datos del año 1999). Reporte Interno RE-005 /00, Residencia de Estudios Cerro Prieto, CFE. Inédito.

Portugal, E., 2015. Muestreo y análisis químico e isotópico de los fluidos de pozos productores del Campo Geotérmico Cerro Prieto. Informe Final, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), Diciembre de 2015. Inédito.

Truesdell, A.H., Nehring, N.L., Thompson, J.M., Janik, C.J., and Coplen, T.B., 1981. The origin of the Cerro Prieto geothermal brine. *Geothermics*, 10, no. 3/4, pp. 225-238.

Truesdell, A.H., Terrazas, B., Hernández, L., Janik, C.J., Quijano, J.L., and Tovar, R., 1989. The response of the Cerro Prieto reservoir to exploitation as indicated by fluid geochemistry. *Proceedings of the CFE-DOE Symposium in Geothermal Energy*, DOE CONF 8904129, pp. 123-132.

Truesdell, A., Mañón, A., Quijano, L., Coplen, T. and Lippmann, M., 1992. Boiling and condensation processes in Cerro Prieto beta reservoir under exploitation. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, CA, pp. 205-214.