

Presencia de flujo cruzado en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Marco Helio Rodríguez Rodríguez

Residencia General de Cerro Prieto, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE. Correo:
marco.rodriguez01@cfе.gob.mx

Resumen

Durante el desarrollo del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, la explotación se ha incrementado en forma gradual provocando una continua caída de presión, que en las porciones central y oriente ha sido de casi 100 bars. Esto ha ocurrido a pesar de la enorme recarga natural inducida por la explotación, favorecida por la alta permeabilidad del yacimiento y la gran disponibilidad de recarga natural de agua de baja temperatura en los alrededores del mismo. Los estratos ubicados encima de los productores presentan temperaturas significativamente menores que éstos, pero debido a las características particulares del yacimiento, no han presentado abatimiento en su presión. En la medida en que la presión de los estratos productores declina, el diferencial de presión hidráulica entre ellos y los estratos sobreyacentes ha sido mayor. Esto ha propiciado que durante los últimos años el fenómeno de flujo cruzado se presente con mayor frecuencia y severidad. En este trabajo se analiza este fenómeno, detallando los mecanismos particulares que lo favorecen e identificando la etapa de perforación o reparación de pozos en la que comúnmente se presenta. La supervisión rigurosa durante esas etapas resulta crucial para poder identificar el flujo cruzado y para tomar las medidas necesarias para salvar el pozo. Se presentan también algunos casos de flujo cruzado en las diferentes etapas de un pozo: perforación, reparación, antes y durante la etapa de estimulación y durante la etapa productiva.

Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto ha estado en explotación comercial desde 1973, cuando entraron en operación comercial las dos primeras unidades generadoras con una capacidad instalada de 75 MW. Se ha ido incrementando la capacidad instalada hasta llegar a los 720 MW a partir del año 2000 con la central CP-IV. El yacimiento ha presentado diversas respuestas a la explotación, dependiendo de la localización de la zona y el tiempo que se esté analizando, pues la respuesta es evolutiva. Sin embargo, la respuesta dominante ha sido una invasión de fluidos de menor temperatura hacia los estratos productores y una significativa caída de presión del yacimiento. Al extraer fluidos de los estratos productores, estos presentan un déficit de masa que provoca un abatimiento de la presión, induciendo la recarga de los fluidos circunvecinos.

La mayor parte del calor almacenado en un yacimiento geotérmico está en la roca estando sólo una pequeña porción en el fluido geotérmico; sin embargo, éste es el único que puede ser transportado o extraído a la superficie para su aprovechamiento. Cuando hay recarga de agua de menor temperatura y esta se desplaza a través de las formaciones geológicas de mayor temperatura, la roca transfiere calor al agua gracias a lo cual se puede continuar explotando el calor del yacimiento; por ello, la recarga es el sustento productivo del sistema (Truesdell and Lippmann, 1990; Truesdell *et al.*, 1998). Sin embargo, durante este proceso la roca se ha va enfriando, lo cual provoca un abatimiento gradual en la entalpía del fluido producido así como en la cantidad de vapor producido, como se ha observado en el sector de Cerro Prieto I (CPI), que es el que ha sufrido un mayor tiempo de explotación.

Diferente a esa recarga que provoca un abatimiento gradual de la producción de vapor es el arribo repentino de agua fría hacia la zona productora, la cual provoca una caída súbita de la producción de vapor y eventualmente la reduce a cero (muerte del pozo). El mecanismo por el cual ocurre esta última situación es el denominado flujo cruzado. El flujo cruzado en pozos en producción se ha presentado con muy baja frecuencia, pero durante las etapas de perforación y/o reparación se ha venido presentando de manera creciente; sin embargo, su detección oportuna permite tomar medidas inmediatas para salvar al pozo.

El objetivo de este trabajo es presentar un panorama general del mecanismo por el que se presenta el flujo cruzado en Cerro Prieto. Para ello se presentan las características y evolución del yacimiento que han favorecido la presencia del flujo cruzado, la etapa crítica durante la perforación y reparación de los pozos y las medidas adoptadas para evitarlo, mostrando los resultados obtenidos.

Flujo cruzado

Se denomina flujo cruzado al paso del fluido del yacimiento de una a otra formación permeable a través del pozo. Cuando la presión hidráulica de una formación es mayor que la del pozo hay aportación del fluido contenido en esa formación hacia el pozo. El fluido que entra al pozo se desplaza verticalmente y se dirige hacia una formación de menor presión hidráulica. La magnitud del flujo cruzado depende de varios factores, entre ellos el diferencial de presión hidráulica entre las dos formaciones permeables y la permeabilidad de cada una. No existe flujo cruzado cuando la presión de los diferentes estratos está balanceada hidráulicamente. En la Figura 1 se muestran esquemáticamente dos situaciones de flujo cruzado en un pozo: un flujo ascendente (cuando $P_2 > P_1$) y otro descendente (cuando $P_1 > P_2$).

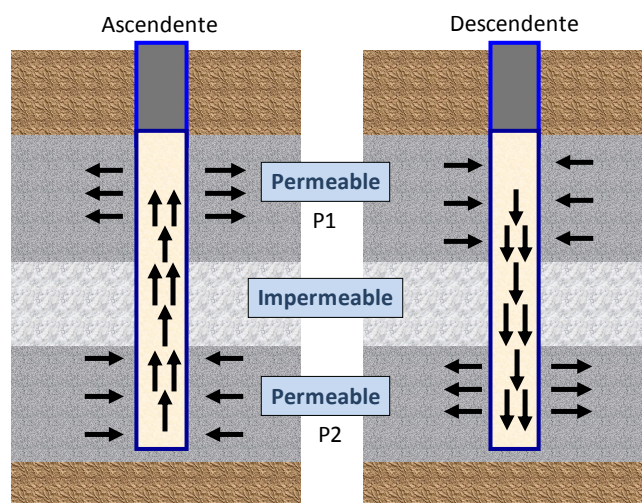


Figura 1. Mecanismo de flujo cruzado ascendente (derecha) y descendente (izquierda).

Es posible que en la industria petrolera se presente con mayor frecuencia flujo cruzado ascendente, porque los estratos productores de petróleo usualmente tienen una presión mayor que los estratos superiores, que pueden contener gas (Petricola and Watfa, 1993). Para el caso de yacimientos geotérmicos se han reportado casos de flujo cruzado ascendente (Menzies *et al.*, 2007), pero también hay referencias de flujo cruzado descendente (Bauer *et al.*, 2005). Para definir si en un caso específico el flujo cruzado es ascendente o descendente se hace un balance de energía mecánica entre los estratos

permeables que se comunican, aplicando la ecuación de Bernoulli. Si la energía mecánica del fluido del estrato superior es mayor el flujo será descendente y si es menor será ascendente.

La ecuación de Bernoulli considera que la energía mecánica en un punto depende de tres componentes: 1) Cinético: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido; 2) Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee; y 3) Potencial gravitacional: es la energía debida a la altitud o elevación a la que está el fluido. Si se aplica la ecuación de Bernoulli para un flujo real o viscoso entre el estrato superior 1 y el estrato inferior 2 en las proximidades del pozo y cuando estos estratos están comunicados a través del pozo, se debe considerar la componente de pérdida de presión por el efecto de la fricción H_f , por lo que la ecuación queda de la siguiente forma:

$$(\rho V_1^2 / 2g) + P_1 + \rho g h_1 = H_f + (\rho V_2^2 / 2g) + P_2 + \rho g h_2 \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido

V = velocidad del fluido en el punto considerado

P = presión del fluido

g = aceleración gravitacional

h = altura en la dirección de la gravedad, desde un punto de referencia

H_f = caída de presión debida a la fricción del fluido durante su recorrido entre los puntos analizados

Subíndices 1 y 2 = condiciones en los estratos somero y profundo, respectivamente.

Si se considera que $\Delta h = h_1 - h_2$, la Ecuación de Bernoulli para flujos reales queda:

$$(\rho V_1^2 / 2g) + P_1 + \rho g \Delta h = H_f + (\rho V_2^2 / 2g) + P_2 \dots\dots\dots (2)$$

Asumiendo que las velocidades del fluido en la formación son bajas y similares (por ejemplo si $V_1=V_2$), la componente cinética puede ser eliminada de la ecuación (2). Considerando ahora la ecuación resultante, se pueden presentar los siguientes tres escenarios:

1) $P_1 + \rho g \Delta h = H_f + P_2$. En este caso no ocurre flujo cruzado, pues la energía mecánica en los estratos superior e inferior está balanceada.

2) $P_1 + \rho g \Delta h < H_f + P_2$. En este caso habría flujo cruzado de tipo ascendente.

3) $P_1 + \rho g \Delta h > H_f + P_2$. En este caso el flujo cruzado sería descendente.

Características del yacimiento

Las características del yacimiento en Cerro Prieto que han jugado un papel determinante para que ocurra flujo cruzado de manera severa son: estratos con alta permeabilidad, enorme disponibilidad de agua de recarga, la distribución de la temperatura en el yacimiento (en particular el perfil de la temperatura de formación) y la evolución del diferencial de la presión entre los estratos productores y los sobreyacentes. Una de las propiedades más determinantes de todo sistema geotérmico es la temperatura, por lo que conocer su distribución en el yacimiento puede tener varias aplicaciones. Por ejemplo, conocer el perfil de temperatura típico de un pozo del campo y el proceso de producción yacimiento-pozo ha sido de gran utilidad para determinar la terminación más idónea de los pozos productores (Rodríguez *et al.*, 2005).

El perfil de la temperatura de formación y la columna litológica de un pozo típico del campo guardan una estrecha relación, como se puede observar en la Figura 2. El perfil de temperatura en los Sedimentos Clásicos No Consolidados (SCNC) presenta un gradiente térmico muy bajo, pues se incrementa de la temperatura ambiente en superficie hasta alrededor de unos 100°C en la base de los SCNC. Tomando en cuenta que dentro del campo productor el espesor de los SCNC varía de 800 a 2200 m, es común que no se alcancen 100°C a profundidades de 1500 ó 2000 m, en particular en los pozos localizados hacia la parte oriental del campo. Esto indica un gradiente térmico prácticamente normal de 1°C por cada 24 metros de profundidad. Subyaciendo a los SCNC se puede encontrar a la unidad de Lodolita, a la Lutita Café o en algunos casos a la Unidad de Lutita Gris, ya que tanto el paquete de la Lodolita como el de Lutita Café aparecen de manera errática, estando ausentes en algunas partes del yacimiento. La unidad de Lutita Gris, que consiste de lutitas con intercalaciones lenticulares de areniscas, es la que conforma el yacimiento geotérmico, cuya cima se identifica con la Cima Mineralógica de Sílice y Epidota (CMSyE). Sin embargo, lo más significativo para este análisis es resaltar que el perfil de temperatura presenta un gradiente muy alto en el intervalo entre la base de los SCNC y la cima de la CMSyE, pues la temperatura se incrementa de 100°C a más de 320°C , en un intervalo de profundidad que varía de 300 a 600 m. Es decir, el gradiente promedio es de 1°C por cada 2.3 metros de profundidad. El perfil de temperatura a lo largo de la zona mineralógica de sílice y epidota se mantiene constante, lo cual es indicativo de zona convectiva, por lo que los pozos se terminan cuidando que su intervalo productor quede dentro de esa zona mineralógica. El inicio del intervalo productor para los pozos localizados en la parte oriental del campo varía de 2300 m a 2700 m de profundidad en promedio. Para el caso del pozo de la Figura 2, el intervalo productor está de los 2500 m a los 2900 m de profundidad.

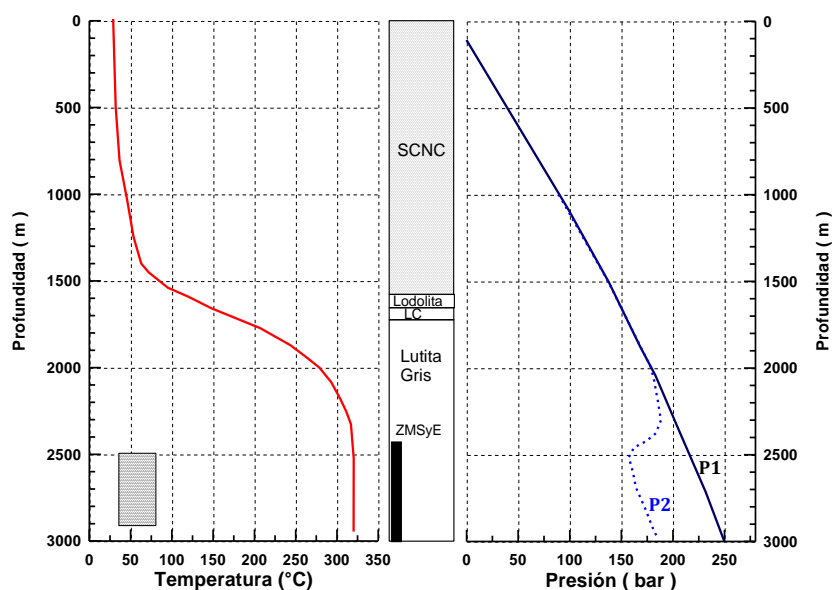


Figura 2. Perfil de temperatura de formación típico para un pozo (izquierda), columna litológica (centro) y perfiles de presión representativos de la formación, pre-explotación (P1) y actual (P2). SCNC: Sedimentos clásticos no consolidados. ZMSyE: Zona mineralógica de sílice y epidota.

El perfil de presión observado en los pozos correspondía, antes de la explotación del yacimiento, al generado por una columna de agua con el nivel de espejo cercano a superficie y con una densidad de columna dependiente de la temperatura de formación, como lo muestra la gráfica P1 de la Figura 2. La presión de los estratos productores como respuesta a la explotación se ha abatido en más de 100 bars, pero prácticamente no ha habido abatimiento en la presión de los estratos ubicados encima de los productores, como lo indica la gráfica P2 de la misma Figura 2. Esto puede explicarse si se tiene

presente que el yacimiento de Cerro Prieto está en rocas sedimentarias cuya permeabilidad dominante es la primaria y cuya permeabilidad horizontal es diez veces mayor que la vertical. Por ello, es razonable esperar que el mayor abatimiento de presión ocurra en sentido predominantemente horizontal, mientras que el abatimiento de la presión sea significativamente menor en sentido vertical. Lo anterior parecería corroborarse con la evolución de los niveles de espejo de agua de los pozos exploratorios localizados a varios kilómetros hacia el este de la zona en explotación, cuya presión se ha venido abatiendo significativamente debido a la propagación horizontal de la caída de presión del yacimiento.

En síntesis, el yacimiento de Cerro Prieto se caracteriza porque hacia el centro y oriente del campo los estratos productores presentan un gradiente térmico diez veces mayor al normal, temperatura promedio de 300°C y abatimiento de la presión promedio de 100 bars, mientras que los estratos sobreyacentes presentan un gradiente térmico diez veces menor, una temperatura menor de 250°C y sin abatimiento de presión significativo.

Etapas críticas de perforación

La construcción típica de un pozo productor en Cerro Prieto empieza perforando con barrena de 26 pulgadas de diámetro (26" Φ) hasta 150 m de profundidad, para instalar y cementar una tubería de revestimiento (TR) de 20" Φ desde la superficie hasta unos 148 m de profundidad. La perforación continúa con barrena de 17½" Φ desde los 150 m de profundidad hasta unos 30 m por debajo de la cima de la unidad de Lutita Gris, la cual puede aparecer a más de 2150 m de profundidad en pozos localizados al sur y al oriente del campo. Posteriormente se corre y cementa una TR de 13 3/8" Φ desde superficie hasta dos metros por arriba del fondo del agujero. Por tanto, antes de que se instale esta TR se tiene un largo intervalo en agujero descubierto (de hasta 2000 metros), a través del cual es posible que se puedan comunicar los diferentes estratos atravesados en ese agujero. Sin embargo, debido a que estos estratos no han sido despresurizados por efecto de la explotación, su presión hidrostática se encuentra balanceada; por ello durante la perforación de estos estratos comúnmente no presentan pérdidas de circulación ni flujo cruzado.

La etapa en sí ha ocurrido flujo cruzado es la siguiente, cuando se perfora el agujero de 12 ¼" Φ . Aunque su longitud es más corta (300 a 600 m) que la del agujero de 17½" Φ , el flujo cruzado ocurre porque a través de ese agujero se ponen en comunicación estratos que no han sido despresurizados (ubicados en las partes menos profundas) con otros con fuerte abatimiento debido a la explotación (localizados en las porciones más profundas).

Un primer indicio de que puede estar presentándose flujo cruzado durante la perforación de un pozo son las pérdidas totales de circulación (PTC). El fluido de circulación tiene como funciones principales las siguientes:

- Transportar los recortes desprendidos de la formación por la acción de la barrena, desde el fondo del agujero hasta la superficie.
- Mantener en suspensión los recortes de la formación, cuando se interrumpe la circulación.
- Controlar las presiones de la formación.
- Limpiar, enfriar y lubricar la barrena y la sarta de perforación.
- Prevenir derrumbes de la formación soportando las paredes del agujero.
- Formar un enjarre liso, delgado e impermeable para proteger la productividad de la formación.

- Ayudar a soportar, por flotación, el peso de la sarta de perforación y de las tuberías de revestimiento.
- Transmitir la potencia hidráulica a la formación por debajo de la barrena.

Cuando ocurre una PTC no es posible mantener controladas las presiones de la formación con las del pozo, ya que la presión en el interior del pozo disminuye en función de la profundidad a la que se localice el nivel del lodo y de su densidad; el nivel puede bajar hasta 1000 m de profundidad, por lo que la presión en el interior del pozo puede disminuir cerca de 100 bars. Si la presión hidráulica de algún estrato comprendido en el agujero descubierto es mayor a la del lodo de circulación en el interior del pozo a la misma profundidad de ese estrato, este empezará a aportar fluidos hacia el pozo. El fluido que entra al pozo se desplazará hacia un estrato permeable cuya presión sea menor a la del lodo de circulación. Cuando empieza la aportación de fluidos de la formación al interior del pozo, el lodo se va mezclando con el fluido invasor, con lo cual irá modificando sus propiedades. Al modificarse sus propiedades también se pueden perder algunas de las funciones, como la de formar un enjarre impermeable en la pared del pozo, por lo que una vez iniciada la PTC y el subsecuente flujo cruzado, es posible que éste se vaya incrementando con el tiempo. De ahí que resulte muy importante tratar de identificar oportunamente el momento de inicio del flujo cruzado, para tomar las medidas necesarias para controlarlo.

Identificación de flujo cruzado

Para poder identificar si está ocurriendo flujo cruzado en un pozo, es necesario correr registros de presión y temperatura de fondo, e interpretarlos. La interpretación de los registros de fondo es todo un arte, ya que antes de tener los resultados es necesario construir una representación mental del perfil que se va a obtener. Y para ello es preciso conocer las condiciones termodinámicas generales del pozo o de la zona donde éste se localiza, así como las condiciones del pozo en las que se corre el registro, por ejemplo, si el registro se corrió cuando el pozo estaba en producción, en inyección o estático. Si el pozo está estático es necesario conocer las etapas previas del pozo, por ejemplo, si el registro se corre después de que el pozo dejó de fluir o después de haber suspendido la inyección de agua. Para este último caso es necesario conocer la temperatura del agua inyectada, ya que la inyección pudo ser en frío o en caliente. También es necesario conocer el tiempo de reposo después de que el pozo dejó de fluir o después de haber suspendido la inyección. Si el registro se corre durante la perforación, aparte de conocer el tiempo de reposo del lodo es preciso conocer las zonas en las que se perforó con pérdida parcial o total de circulación y el volumen del lodo perdido. Toda esta información debe tomarse en cuenta para tener una idea de lo que se puede esperar del registro.

Una vez obtenido el registro se debe comparar con el perfil mental que se elaboró y con el perfil típico o representativo de la formación, ya sea el estimado o el real de la zona, para poder identificar las anomalías que se presenten. Se debe tener presente que el perfil obtenido no es producto de la casualidad pues todo debe tener una explicación basada en los principios básicos de la física, y en particular de la mecánica de fluidos para el caso de los perfiles de presión y de la termodinámica, específicamente de la transferencia de calor, para el caso de los registros de temperatura.

Finalmente, es necesario combinar las interpretaciones del perfil de presión y el de temperatura, hasta lograr una interpretación consistente y concordante con ambos perfiles. Para la interpretación de registros de fondo se debe de partir de la información elemental de las condiciones del yacimiento y aplicar los principios básicos, recordando que las explicaciones simples y sencillas son regularmente las correctas.

Por la evolución del yacimiento de Cerro Prieto, en particular la de su presión, las anomalías encontradas en los registros de presión y temperatura cuando se presenta flujo cruzado son muy significativas, lo cual facilita su identificación. Aunque las anomalías térmicas no sean tan significativas en los pozos petroleros, comparadas con el alto gradiente geotérmico de los yacimientos geotérmicos, en la industria petrolera esas anomalías se utilizan para diagnosticar problemas de pozos como el flujo cruzado, pérdidas o fugas de producción, entre otros (Johnson *et al.*, 2006; Petricola and Watfa, 1993).

Durante la perforación de los pozos geotérmicos, antes de correr una tubería de revestimiento es importante identificar si existe flujo cruzado, con el objeto de eliminarlo si así es. De lo contrario el pozo no quedará bien cementado, por lo cual puede presentar una canalización del agua por el espacio anular que invadirá la zona productora, con lo que se perderá la producción del pozo. Algunas de las medidas implementadas en Cerro Prieto, como la de colocar tapones de cemento para obturar la zona de pérdidas, han sido ampliamente documentadas (Pelayo Ledesma *et al.*, 2009).

Para identificar si existe flujo cruzado antes de instalar una tubería de revestimiento, se debe correr una serie de cuando menos dos registros de presión-temperatura, con diferente tiempo de reposo. Por lo regular se deja un lapso de 4 horas entre cada registro, tiempo suficiente para que el lodo del pozo aumente su temperatura unos grados centígrados por la transferencia de calor de la formación.

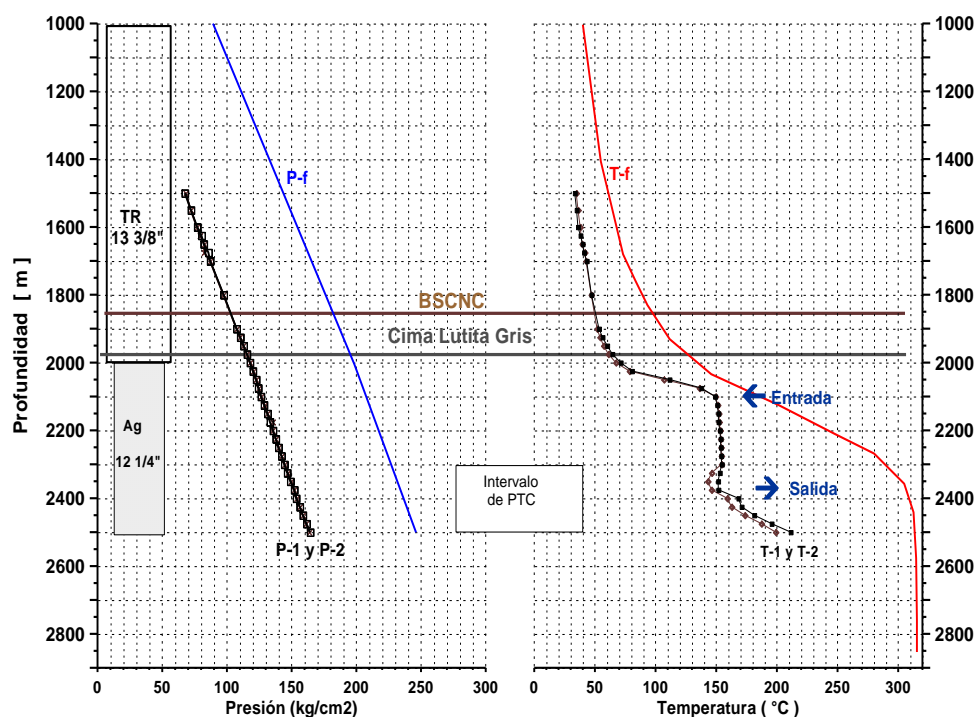


Figura 3. Registros de presión y temperatura en agujero descubierto, previamente a la corrida de la TR, incluyendo los perfiles de presión y temperatura estimados de la formación.

En la Figura 3 se muestran los perfiles de presión y temperatura de la formación (P-f y T-f respectivamente) y una serie de dos registros de presión y temperatura, con 6 y 10 hrs de reposo. También se incluye información relevante como el diagrama de terminación del pozo, la base de los SCNC y la cima de la Lutita Gris, así como el intervalo de PTC. En este ejemplo el intervalo en agujero

descubierto de 12¼" Φ es de 2000 m a 2500 m de profundidad, y en él se determinará si existe o no flujo cruzado.

El perfil estimado de presión de la formación, considera que el nivel de lodo se encuentra en superficie, con una densidad relativa de 1. El perfil de temperatura fue estimado considerando la relación con la litología y con registros de temperatura de pozos aledaños. Se puede observar en la figura que los registros P-1 y P-2 dan valores similares ya que se enciman, pero si se comparan con el perfil estimado de la presión de la formación, se observa que existe un desfase aproximado de 75 kg/cm². Considerando el gradiente de presión del registro P-1, se determina que el nivel del lodo se localiza a 800 m, debido a que el lodo se perdió en la formación probablemente en la zona de PTC. Con los registros de presión no es posible determinar si existe flujo cruzado, pero permiten definir que existe un diferencial hidráulico entre los estratos menos profundos del agujero de 12¼" Φ , donde no se presentaron pérdidas de circulación, con respecto a los estratos inferiores, donde sí hubo PTC.

El perfil del registro de temperatura T-1, con 6 horas de reposo, muestra una temperatura considerablemente menor respecto a la temperatura estimada de la formación, T-f, como era de esperar. Sin embargo, a los 2100 m la diferencia de temperatura entre esos perfiles es menor, y justamente a partir de esa profundidad la temperatura se mantiene constante hasta los 2300 m. Se observa una ligera inversión de temperatura en los siguientes 50 m que se recupera gradualmente hasta alcanzar los 200°C a 2500 m. El registro T-2, con 10 horas de reposo, muestra una ligera recuperación de temperatura de un par de grados a profundidades menores de 2100 m y de aproximadamente 10°C a profundidades mayores de los 2300 m. Pero en el intervalo de 2100 m a 2300 m, su recuperación fue prácticamente nula (menor a 1°C), lo cual se interpreta como flujo cruzado descendente con aportación de fluido de la formación hacia el pozo a los 2100 m de profundidad, descendiendo dentro del pozo hasta los 2300 m, donde el fluido se introduce en otro estrato.

Estrategia para eliminar el flujo cruzado

Antes de implementar cualquier medida para eliminar el flujo cruzado se debe tener presente que, como se dijo, debe existir un estrato permeable que aporte fluidos al pozo y otro que los reciba. Por ello, una estrategia común ha sido obturar alguno de esos estratos permeables. Como es más fácil obturar los estratos que aceptan fluido que los que lo aportan, se ha implementado obturar con tapones de cemento la zona permeable de aceptación, la cual se localiza por lo regular en la parte inferior del agujero. Una inmediata indicación de la efectividad de los tapones es observar que se recupera la circulación de lodo.

Para evaluar la efectividad de los tapones de cemento debe correrse otra serie de registros de presión-temperatura con 6 y 10 horas de reposo del lodo, como los que se muestran en la Figura 4. En esta aparecen los registros P-3 y P-4 corridos después de colocar los tapones de cemento y haber reconocido el agujero, los cuales presentan una recuperación de la presión de aproximadamente 60 kg/cm² respecto a los registros previos.

Con los registros de presión no se puede identificar si el flujo cruzado fue eliminado, aunque sí ofrecen algunos indicios. En cambio, son los registros de temperatura T-3 y T-4 lo que determinan que ya no ocurre flujo cruzado, pues en ellos no se observa ningún intervalo de profundidad con temperatura constante. Además se observa una recuperación de temperatura de más de 10°C a lo largo del intervalo en agujero descubierto, lo cual contrasta con los perfiles previos, cuando ocurría flujo cruzado.

Casos presentados en el campo

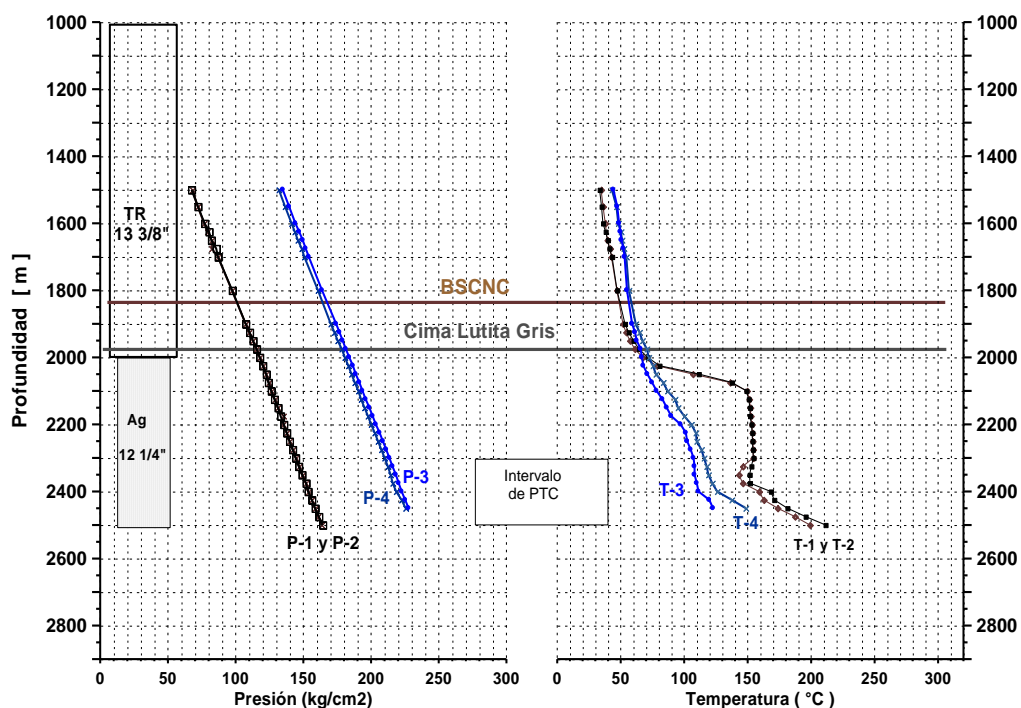


Figura 4. Registros de presión y temperatura antes y después de colocar tapón de cemento y reconocer el agujero de 12 1/4" Φ .

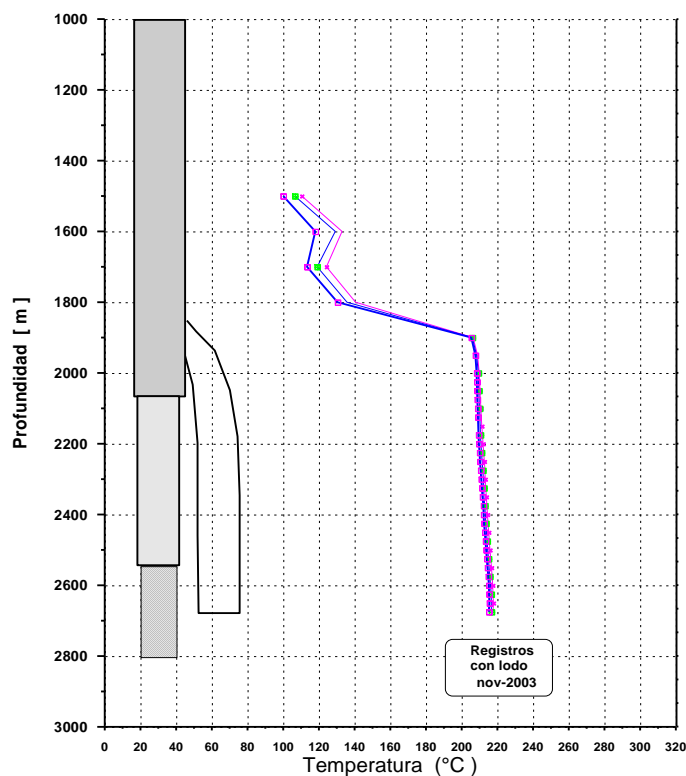


Figura 5. Caso de flujo cruzado presentado durante la reparación de un pozo, al abrir ventana y perforar lateralmente hasta la profundidad del intervalo productor anterior.

Los casos más comunes de flujo cruzado en los pozos de Cerro Prieto ocurren durante la perforación del agujero de 12 1/4" Φ , como el presentado en la sección anterior. Sin embargo, los primeros casos de

flujo cruzado en el campo se presentaron durante los trabajos de reparación de pozos, particularmente cuando la reparación consistió en abrir una ventana y perforar agujero a profundidades cercanas al antiguo intervalo productor del pozo, como el caso que se muestra en la Figura 5.

Para los siguientes casos se omiten los registros de presión por cuestiones del alcance del presente artículo, y debido a que los registros de temperatura son más útiles para identificar flujos cruzados.

Cuando el flujo cruzado se presenta durante la perforación o reparación de un pozo la situación no es tan crítica, debido a que estando el equipo instalado se pueden hacer las operaciones para controlarlo. El problema se vuelve más crítico cuando el flujo cruzado ocurre durante las etapas de observación, antes de la estimulación del pozo, o durante la etapa productiva.

Cuando el flujo cruzado ocurre en la etapa previa a la estimulación del pozo es muy difícil que este logre fluir, aunque esto dependerá de lo severo del flujo cruzado. Este fue el caso del pozo 234D, que en el año 2008 se estimuló sin lograr que fluyera. El registro de temperatura previo al de la estimulación corresponde al T-5, corrido 40 horas después de haberse lavado el pozo. Este registro no presenta evidencia de flujo cruzado, con temperaturas máximas en la zona del intervalo ranurado de 265°C. El registro T-6, con más de 2.5 meses de reposo, muestra temperaturas menores al registro previo en la zona del intervalo ranurado, como se puede observar en la Figura 6. Los registros T-7 y T-8 fueron corridos al suspenderse la inducción, observándose que la temperatura disminuía, por lo que se determinó que la inducción estaba contribuyendo a que descendiera un mayor flujo de fluidos menos calientes hacia la zona productora. Se determinó que el flujo era por el espacio anular, por lo que la reparación del pozo consistió en hacer disparos a la TR de 9 5/8" Φ y a través de los agujeros de los disparos se realizaron cementaciones forzadas, encamisando el intervalo con TR ciega de 7" Φ (Castillo y Navarro, 2009). Las operaciones fueron exitosas, ya que se logró eliminar el flujo cruzado como se puede observar por el perfil T-14, corrido con 15 días de reposo y antes de la nueva estimulación. Finalmente el pozo fluyó integrándose a producción con unas 80 t/h de vapor.

Finalmente, aunque con muy baja frecuencia, es posible que se presenten desprendimientos o rupturas en pozos en producción, provocando un flujo cruzado severo que de forma fulminante provoca la muerte del pozo, aunque éste presentara alta presión de cabezal y producción. En la Figura 7 se presentan los registros de temperatura en dos pozos que dejaron de fluir, el pozo 431D, en 2008, y el pozo 446D, en 2009. En ambos casos se determinó flujo cruzado al comparar estos registros con el registro estimado del perfil de la temperatura de la formación, y en los dos la reparación consistió en obturar con cemento la zona de aportación y encamisar la zona con tubería ciega de menor diámetro, logrando eliminar el flujo cruzado. El pozo 431D actualmente está en producción, con más de 60 t/h de vapor, mientras que el pozo 446D entrará a estimulación a finales de 2009.

Conclusión

Para comprender el flujo cruzado ha sido crucial conocer la evolución de la presión del yacimiento, la estimación de los perfiles de presión y temperatura representativos de la formación, y aplicar a las propiedades determinadas balances de conservación de energía.

Las características y la evolución del yacimiento de Cerro Prieto, como respuesta a su explotación, han propiciado flujos cruzados de manera más continua y con mayor severidad durante los últimos años.

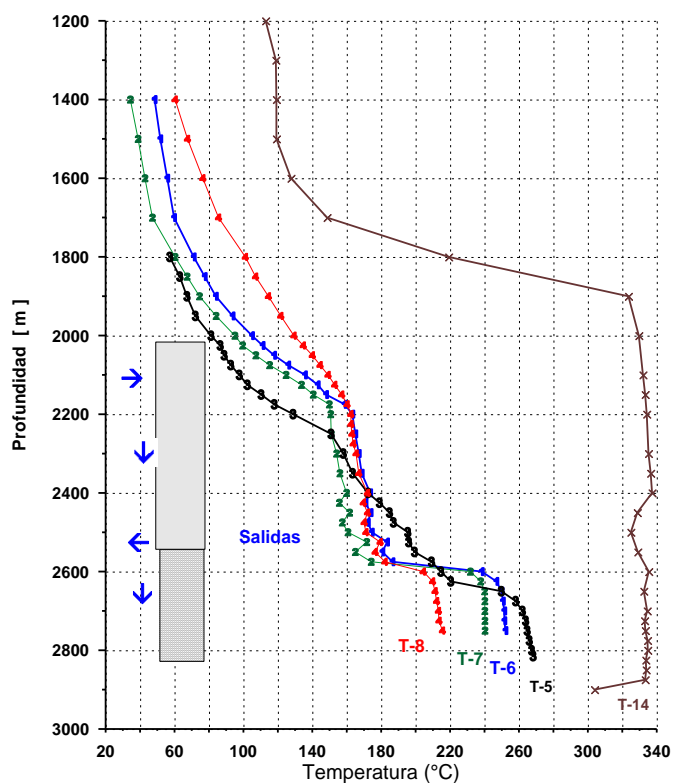


Figura 6. Registros de temperatura del pozo 234D, en los cuales se muestra que la temperatura de los registros T-5 al T-8 eran influenciados por flujo cruzado, mientras que el registro T-14 fue corrido después de su reparación para eliminar el flujo cruzado.

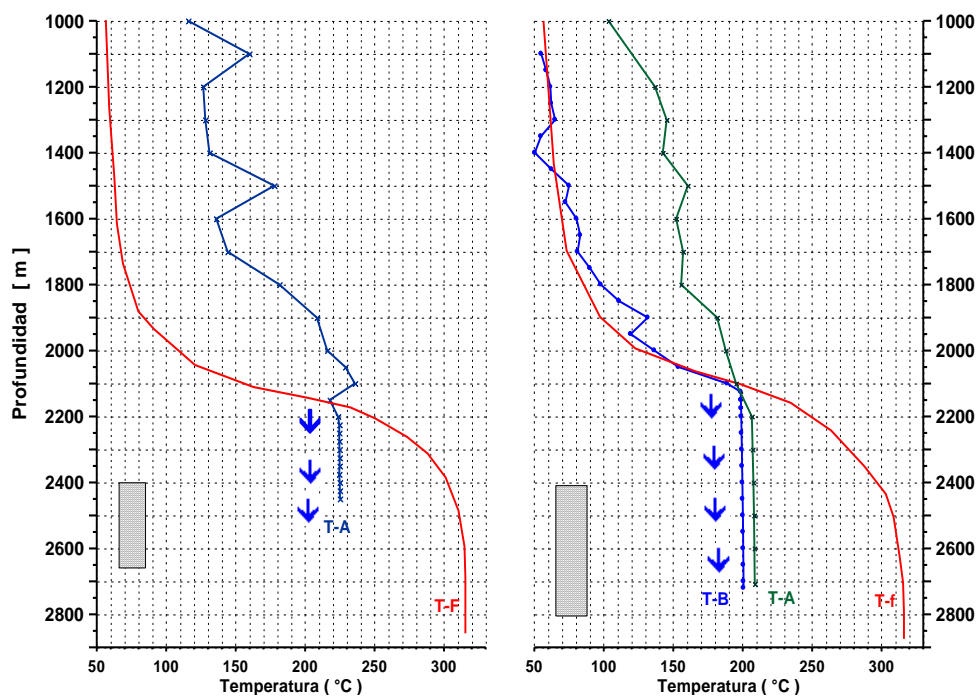


Figura 7. Registros de temperatura de los pozos 431D (izquierda) y 446D (derecha) mostrando los registros indicativos de flujo cruzado (T-A) y los de la temperatura de formación (T-f).

El trabajo en equipo entre las áreas de Perforación, Reparación de Pozos y Estudios de la Residencia General de Cerro Prieto ha permitido comprender el fenómeno y la importancia de los registros de fondo durante las etapas previas a las corridas de TR para identificarlo, y en su caso para proceder con las operaciones para eliminarlo.

Las medidas adoptadas cuando ocurre flujo cruzado durante la perforación, como la colocación de tapones de cemento y los disparos y cementaciones forzadas, han demostrado su efectividad para controlarlo y eliminarlo.

Referencias

Bauer, S., P. Gronewald, J. Hamilton, A. Mansure, 2005. High-temperature plug formation with silicates. *Proceedings 30th Workshop GRE, Stanford University*.

Castillo Méndez, E., y R. Navarro Jerez, 2009. Pozo 234D: un caso de “flujo cruzado” en el campo geotérmico de Cerro Prieto. CFE, *Memorias de la IV Reunión Interna de Mejora Continua – Morelia, Mich., Septiembre de 2009*.

Johnson D., J. Sierra, D. Gualtieri, and J. Kaura, 2006. DTS Transient Analysis: A New Tool to Assess Well-Flow Dynamics. *SPE 103093*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 24-27 September 2006, San Antonio, Texas, USA.

Menzies, A.J., R.J. Swanson and J.A. Stimac, 2007. Design Issues for Deep Geothermal Wells in the Bulalo Geothermal Field, Philippines. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 31.

Pelayo Ledesma, A., A. Chow Escobedo, A. Panti Argáez, A. Torres Castillo, F. Pérez Pérez y J.C. Campos, 2009. Cementación de la tubería de revestimiento de 0.244 m Ø en pozos de Cerro Prieto donde se ha detectado flujo entre zonas. CFE, *Memorias de la IV Reunión Interna de Mejora Continua – Morelia, Mich., Septiembre de 2009*.

Petricola, M.F.J., and M. Watfa, 1993. Multiwell Application of Downhole Temperature Profiles for Crossflow Analysis. *SPE 25630*. Middle East Oil Show, 3-6 April 1993, Bahrain.

Rodríguez R., M.H., J.S. de León V., A. Pérez H. y M. Corona R, 2005. Relación entre la terminación de pozos y la producción de vapor para el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Memorias del Congreso Anual 2005 de la AGM*, Los Azufres, Mich., Noviembre de 2005.

Truesdell, A.H., and M.J. Lippmann, 1990. Beneficial Effects of Groundwater Entry into Liquid-Dominated Geothermal Systems. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 14, pp. 721-727.

Truesdell, A.H., M.J. Lippmann, H. Gutiérrez, and J.S. de León, 1998. The importance of natural fluid recharge to the sustainability of the Cerro Prieto resource. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 22, pp. 529-536.