

Estado térmico inicial del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México

Alfonso García Gutiérrez

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor., México.

Correo: aggarcia@iie.org.mx

Resumen

En este trabajo se presenta el campo de temperatura inicial del yacimiento geotérmico de Los Humeros y una curva de elevación contra la temperatura de formación o temperatura más probable del yacimiento, obtenida para 40 pozos del campo. Las temperaturas estabilizadas se estimaron mediante el método de Flujo de Calor Esférico Radial, y su elección sobre las temperaturas del método de Horner se soporta con simulación numérica de los procesos de circulación y paro del pozo H-26, en la cual la última serie de registros se reprodujo considerando pérdidas de circulación. Con estas temperaturas se generaron curvas isotérmicas para tres secciones geológicas del campo, que constituyen la distribución inicial de temperatura del yacimiento, y muestran las características térmicas y la relación entre anomalías térmicas y fallas del yacimiento. La curva de elevación contra temperatura inicial de formación se generó a partir de la detección de las zonas principales de alimentación de cada pozo mediante un análisis detallado de información diversa, tal como registros de temperatura, pérdidas de circulación, litología, terminación de pozos y velocidades de calentamiento, entre otras. De los resultados obtenidos se distinguen dos grupos de pozos: uno entre 1000 y 1650 msnm con temperaturas de 290 a 330° C, y otro grupo entre 900 y 0 msnm con temperaturas entre 300 y 400° C.

Palabras clave: Los Humeros, ingeniería de yacimientos geotérmicos, temperatura estabilizada, temperatura inicial.

Initial thermal state of the Los Humeros, Puebla, Mexico, geothermal field

Abstract

The initial temperatures field is presented for 40 wells in the Los Humeros geothermal reservoir, along with an elevation curve based on the formation temperature or the most probable reservoir temperature. Stabilized temperatures were estimated using the Radial Spherical Heat Flow method, chosen over the Horner method based on the numerical simulation of the circulation and stop processes of well H-26. In this well, the last temperature log series was reproduced, considering circulation losses. The temperatures were used to produce isothermal curves over three geological sections of the field, which represent the initial distribution of temperatures in the reservoir and show the thermal characteristics and the relationships among thermal anomalies and faults in the reservoir. The elevation curve plotted against the initial temperature of the formation was generated based on detection of the main feed zones at each well, which in turn was developed using detailed analyses of diverse information, such as temperature logs, circulation losses, lithology, well completion, and heat velocities. Based on the results, two groups of wells may be distinguished: one between 1000 and 1600 masl with temperatures from 290 to 330° C, and one between 900 and 0 masl with temperatures from 300 to 400° C.

Keywords: Los Humeros, geothermal reservoir engineering, stabilized temperature, initial temperature.

1. Introducción

El campo geotérmico de Los Humeros se localiza en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano ($19^{\circ} 40'$ latitud N, $97^{\circ} 25'$ longitud W), a unos 200 km de la Ciudad de México. Su explotación comercial empezó en 1990 con la puesta en operación de una unidad de 5 MWe. Hoy existen más de 40 pozos perforados y se tienen 40 MWe de capacidad instalada a base de unidades de 5 MWe. La Figura 1 muestra la distribución de los pozos en este campo y la orientación de tres secciones o cortes geológicos que se discuten más adelante. Las elevaciones de las zonas productoras se encuentran entre -12 y 1610 msnm.

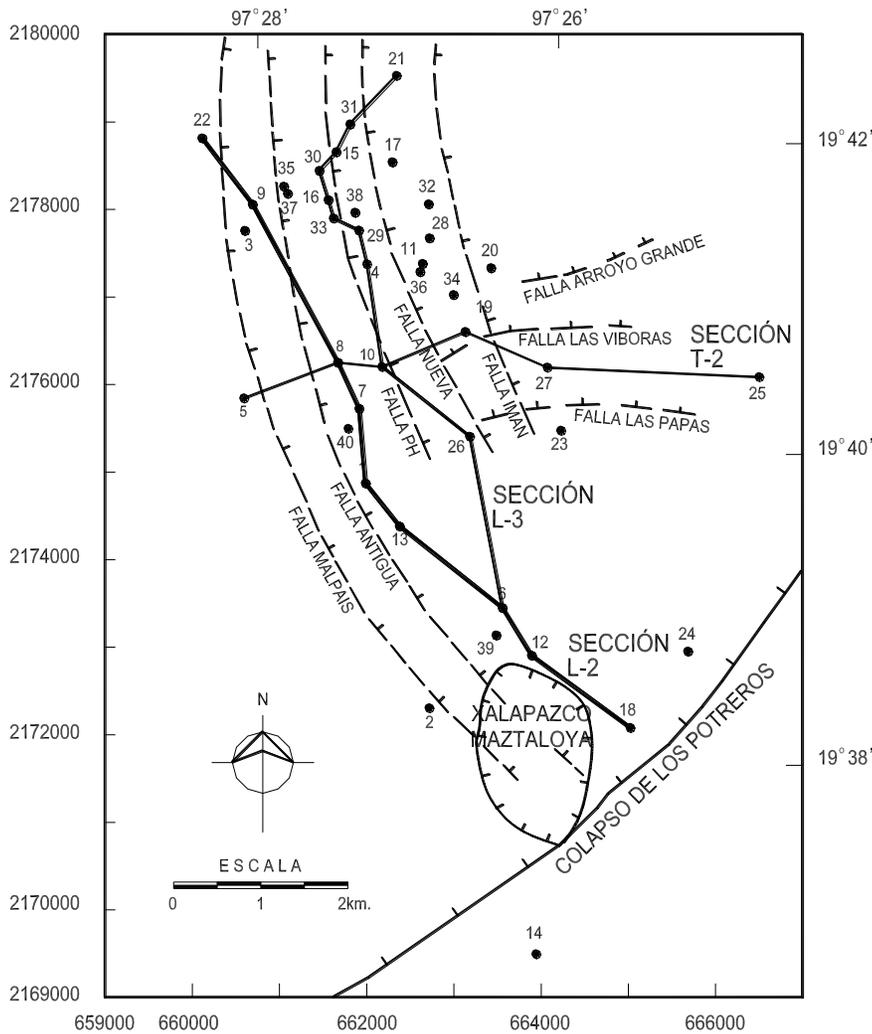


Fig. 1. Distribución de pozos en el campo geotérmico de Los Humeros

En 1989 la terminación original de algunos pozos localizados en el llamado Colapso Central fue modificada debido a la ocurrencia de procesos de corrosión-obturación en las tuberías profundas, ocasionados por la presencia de fluidos ácidos. El pozo H-1, localizado en el Corredor de Maztaloja, también fue desviado por causas de incrustación en las tuberías. La mayoría de los pozos profundos producen una alta fracción de vapor a las condiciones de separación y presentan el fenómeno de exceso de entalpía o exceso de vapor, lo que dificulta la reconstrucción de la composición química del fluido a condiciones de yacimiento. Este hecho afecta también la correcta estimación de temperaturas mediante geotermometría, por lo que se utilizaron técnicas de Ingeniería de Yacimientos para estimar las temperaturas iniciales de este yacimiento. Las características geológicas de este yacimiento han sido descritas con anterioridad (Arellano *et al.*, 1998; 1999; 2000), mientras que la geoquímica de

gases del yacimiento ha sido descrita por Barragán *et al.* (1999; 2000) y el origen de los fluidos ácidos y la alteración hidrotermal han sido reportados por Izquierdo *et al.* (2000). Campos y Durán (1986) determinaron el campo de temperaturas de Los Humeros resolviendo la ecuación bidimensional de difusión de calor en régimen permanente. Sin embargo, sus resultados se consideraron preliminares ya que no se contaba con mediciones del flujo de calor para alimentar su modelo. Arellano *et al.* (1998) y García *et al.* (2000a) presentaron el campo de temperatura inicial en forma detallada, y sus resultados parecen ser los últimos y más completos sobre la condición térmica inicial del campo.

El presente trabajo forma parte de un estudio más amplio realizado para: (a) confirmar la posible existencia de dos yacimientos; (b) determinar las condiciones iniciales del o los yacimientos, (c) definir el origen de los fluidos ácidos observados en la parte profunda del sistema geotérmico, entre otros (Arellano *et al.*, 1998). En particular, en este trabajo se presenta, en primer lugar, el campo inicial de temperaturas del yacimiento geotérmico de Los Humeros en forma de curvas isotérmicas en tres secciones geológicas del campo, y en segundo lugar, una curva de elevación contra temperatura obtenida a partir de información multidisciplinaria de 40 pozos del campo. En sí, este trabajo constituye una versión resumida de los trabajos anteriores (Arellano *et al.*, 1998; García *et al.*, 2000a).

2. Campo inicial de temperaturas de Los Humeros

El campo de temperaturas iniciales de yacimiento de Los Humeros se obtuvo a partir de las temperaturas estabilizadas que se determinaron mediante los métodos de Horner y la esfera (Ascencio *et al.*, 1994) usando los registros de temperatura de 40 pozos de este campo. Con estas temperaturas se construyó un perfil de temperatura de la formación para cada pozo y se correlacionaron dichas temperaturas con la probable zona de alimentación más importante de cada pozo, es decir, la parte donde el pozo y el yacimiento están en contacto, poniendo especial cuidado en que el efecto convectivo no afectase las temperaturas estimadas para las zonas de aporte, según la metodología de Grant *et al.* (1982; 1984). Finalmente, se trazaron las isothermas del campo en tres secciones o cortes geológicos transversales del yacimiento.

2.1. Temperaturas estabilizadas de la formación por el método de Horner

Es uno de los métodos más comúnmente usados para estimar temperaturas estabilizadas de las formaciones y consiste de una gráfica de temperatura a pozo cerrado (sin circulación) contra el logaritmo del tiempo adimensional de Horner. Se basa en el concepto de una línea fuente/sumidero de calor infinitamente larga sin sección transversal para representar los procesos de circulación y paro. El modelo matemático representativo es:

$$T_{ws} = T_i - m \log \left(\frac{t_c + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

donde t_c es el tiempo de circulación, Δt es el tiempo de reposo, T_{ws} es la temperatura del pozo en reposo, $[(t_c + \Delta t)/\Delta t]$ es el tiempo adimensional de Horner y T_i es la temperatura inicial o estabilizada de la formación. Así, una gráfica de T_{ws} contra $[(t_c + \Delta t)/\Delta t]$ describe una línea recta con pendiente m y ordenada al origen T_i . Aunque el método de Horner ha sido usado ampliamente en la industria geotérmica, se considera que subestima las temperaturas de las formaciones y se ve limitado cuando se tienen gradientes de temperaturas muy pequeños y tiempos de circulación muy cortos (Dowdle y Cobb, 1975).

2.2. Temperaturas estabilizadas de la formación por el método de la esfera

El método supone un modelo de flujo de calor conductivo en coordenadas esférico-radiales para la formación a fondo de pozo, a diferencia de la geometría cilíndrica radial del método de Horner. Conceptualmente, la formación enfriada por la circulación de fluido se trata como una esfera de radio R , suponiendo que la formación es homogénea e isotrópica, con propiedades constantes. El modelo matemático de este método está dado por (Ascencio *et al.*, 1994):

$$T_{ws} = T_i - \frac{m}{\sqrt{\Delta t}}; \quad m = \frac{R(T_i - T_f)}{\sqrt{\pi\alpha}} \quad (2)$$

En esta ecuación, T_f es la temperatura del fluido en el pozo al término de la circulación, R es el radio de la esfera afectada térmicamente y α es la difusividad térmica del medio. La temperatura estabilizada se obtiene

una línea recta de T vs $(1/\Delta t^{1/2})$ cuya pendiente es m y la ordenada al origen es T_i . En este método no se requiere conocer explícitamente el tiempo de circulación para obtener la temperatura estabilizada.

2.3. Resultados de temperaturas estabilizadas por los métodos de Horner y la esfera

La estimación de la temperatura estabilizada de 40 pozos de Los Humeros por los métodos de Horner y de la esfera arrojó unas 180 estimaciones por cada método al considerar todas las series de registros de cada pozo, original o reparado. De los resultados se pudo observar que existen diferencias significativas en los resultados que producen ambos métodos, siendo siempre mayores las temperaturas obtenidas con el método de la esfera. Esto es de esperarse ya que el método de Horner normalmente subestima la temperatura de la formación (Ascencio *et al.*, 1994). También es importante notar que los coeficientes de correlación de ambos métodos son muy altos, pero por lo general los del método de la esfera son superiores.

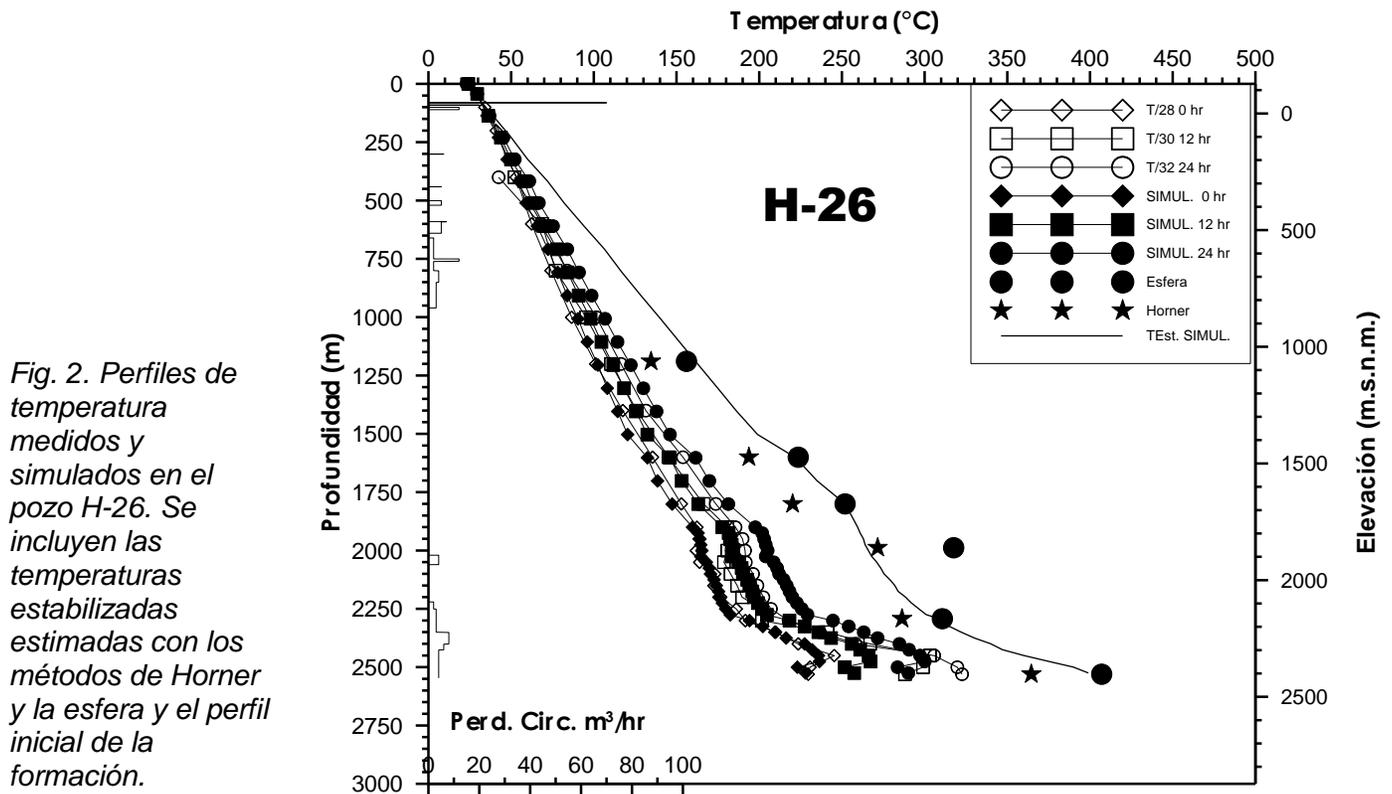
2.4. Simulación del pozo H-26

Se simularon varios pozos con el fin de determinar si el perfil de temperatura estática de la formación estimado con el método de Horner o el de la esfera permite reproducir los perfiles de temperatura medidos (registros) en un pozo en perforación. Se incluye la simulación del pozo H-26 como caso típico. La simulación considera las pérdidas de circulación del pozo. La condición inicial de temperatura es un perfil supuesto (esta condición inicial es equivalente a la temperatura imperturbada de la formación antes de que se perfora el pozo). Dicho perfil se modifica hasta reproducir, por prueba y error, los perfiles medidos. La última versión obtenida del perfil de temperatura inicial se considera como la mejor aproximación al perfil de temperatura del yacimiento alrededor del pozo simulado. Este último perfil es conceptualmente el perfil de la temperatura imperturbada de yacimiento y deberá ser muy similar al perfil que se genere, al menos aproximadamente, con los resultados de las temperaturas estáticas de la formación obtenidas, ya sea por el método de la esfera o el de Horner. Para la simulación, se utilizó el simulador GEOTRANS (García *et al.*, 1996; García *et al.*, 2000b).

La información requerida para efectuar las simulaciones es extensa y se obtuvo de la historia de perforación del pozo. La simulación parte de un perfil inicial de temperatura (la temperatura imperturbada de la formación) y el pozo se perturba enfriándolo mediante circulación de fluido de perforación. Después de este periodo, se detiene la circulación y se registra la distribución de temperaturas en el pozo y la formación para que esta nueva distribución sirva como condición inicial para el proceso de calentamiento y retorno al equilibrio térmico. Durante este periodo de calentamiento, se reproducen los perfiles de temperatura medidos (registros) con el pozo en reposo. Si el ajuste entre perfiles medidos y simulados no es satisfactorio, se supone un nuevo perfil de temperatura antes de enfriar el pozo y se repite el proceso hasta mejorar la convergencia. El proceso es complejo y se complica más en presencia de pérdidas de circulación, pues estas se convierten en otro parámetro de ajuste.

Con la información descrita arriba se simuló un proceso de circulación de lodo, con un gasto de $133 \text{ m}^3/\text{h}$ de lodo entrando a 20° C , suponiendo una temperatura de superficie de 25° C . Las propiedades del lodo son: conductividad térmica = 0.7 W/m-K , densidad = 1080 kg/m^3 , viscosidad = 0.044 N-s/m^2 y calor específico = 4100 J/kg-K . El tiempo de circulación fue de 2.5 horas con lo que el pozo sufrió un proceso de enfriamiento, al final del cual cesó la circulación y el pozo empezó a calentarse. Al final del periodo de circulación se tiene el tiempo final de circulación que equivale al tiempo cero de reposo. Aunque normalmente no se tienen registros a 0 horas de reposo, en el caso del pozo H-26 se reporta el registro T-28 con 0 horas de reposo (dependiendo de la profundidad del pozo, las temperaturas de fondo del registro a 0 horas de reposo corresponden a tiempos del orden de 1 a 1.5 horas). Entonces, durante la simulación se reprodujo numéricamente este perfil al final de la circulación (principio del calentamiento), y los demás perfiles medidos (registros) se reprodujeron durante el periodo de calentamiento del pozo.

La Figura 2 muestra una comparación entre los perfiles medidos y simulados a 0, 12 y 24 horas de reposo. Como se puede observar, la reproducción es satisfactoria, aunque los perfiles simulados a 24 horas muestran una recuperación ligeramente mayor en la zona de pérdidas comprendida entre 1900 y 2300 m de profundidad. Este hecho puede asociarse a la transferencia de calor más intensa y prolongada en el pozo descubierto (nótese que la TR de 9-5/8" termina a los 1903 m de profundidad). A la derecha de la figura se tiene una línea continua. Esa curva es el perfil de temperatura que tendría la formación antes de perturbar el yacimiento, perturbación que es causada por la perforación de pozo. Este es el perfil que se usó para simular el periodo de circulación en el pozo. Dicho perfil fue modificado iterativamente hasta que se lograron reproducir los perfiles medidos en el pozo. Se puede observar que esta curva pasa muy de cerca de las temperaturas estáticas calculadas por el método de la esfera.



2.5. Elección de temperaturas estabilizadas para determinar el campo de temperaturas iniciales

Entre las temperaturas estabilizadas obtenidas por los métodos de Horner y la esfera, se seleccionaron como más representativas de las temperaturas de yacimiento a las temperaturas estimadas mediante el método de la esfera, con base en dos criterios: (1) que el método de Horner normalmente subestima las temperaturas de formación, y (2) que la simulación de circulación y paro en el pozo H-26 indica que los registros de temperatura se pueden reproducir mejor usando las temperaturas obtenidas con el método de la esfera como condición inicial, lo cual constituye un criterio adicional para la elección de temperaturas.

2.6 Distribución de temperatura inicial en secciones geológicas

La Figura 3 muestra una sección geológica longitudinal con rumbo general NW-SE que une los pozos H-22, H-9, H-8, H-7, H-1, H-13, H-6, H-12 y H-18. Las isotermas mostradas van de 150 a 350° C, y la parte más caliente y más somera se localiza entre los pozos H-8 y H-9. Entre estos pozos también se observa un

ascenso de las isotermas, relacionado con el ascenso de fluidos, al igual que en el pozo H-1. La parte más caliente y menos profunda se localiza también en el pozo H-8, alcanzando unos 300°C a 1250 msnm y unos 350°C a 900 msnm. De la Tabla 1 se infiere que todos los pozos tienen sus horizontes permeables en la unidad 9 (calizas metamorfizadas), excepto los pozos H-1, H-7 y H-12. El pozo H-1 tiene su horizonte permeable en la unidad 5 (andesitas de augita Teziutlán), el pozo H-7 muy cerca del contacto entre las unidades 7 y 8 (andesitas de hornblenda y basaltos), y el pozo H-12 en un intrusivo localizado en las Calizas metamorfizadas.

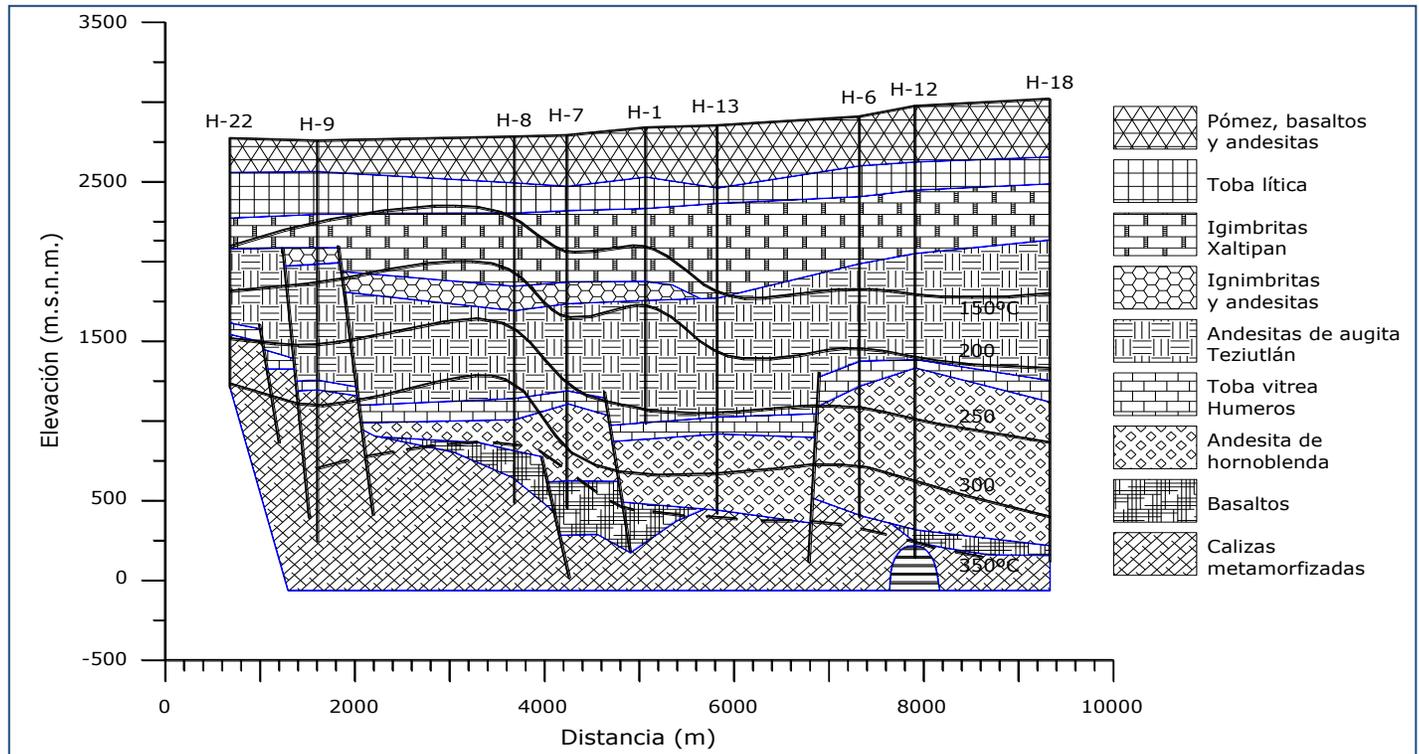


Fig. 3. Distribución de temperatura inicial en la sección geológica L2 (rumbo general NW-SE).

La Figura 4 muestra una sección geológica longitudinal con rumbo general NNW-SSE que une a los pozos H-21, H-31, H15, H-30, H16, H-33, H-29, H-4, H-10, H-26 y H-6. El ascenso de las isotermas, relacionado con el ascenso de fluidos, es notable alrededor del pozo H-33, donde se alcanzan temperaturas de 300°C a unos 1500 msnm. También se observa un ascenso alrededor del pozo H-15 asociado a una falla o fractura. En este caso, de la Tabla 1 se observa que pozos H-15, H-30, H-33 y H-4 tienen sus principales zonas permeables en la unidad 5 (andesitas de augita Teziutlán). Los pozos H-16 y H-29 tienen su principales zonas permeables en la unidad 8 (basaltos); el pozo H-10 muy cerca del contacto entre la toba vítrea Los Humeros y las andesitas de hornblenda (unidades 6 y 7); los pozos H-21, H-31 y H-6 en las calizas metamorfizadas y el pozo H-26 en una intrusión localizada en las calizas.

La Figura 5 muestra una sección geológica transversal con rumbo general W-E que une a los pozos H-5, H-8, H10, H-19, H-27 y H-25. Las temperaturas más altas y someras se localizan entre los pozos H-5 y H-10, y el ascenso de fluidos se asocia con las fallas mostradas en el lado izquierdo de la Figura 1. Los pozos H-5 y H-8 tienen su principales zonas permeables en las calizas metamorfizadas; el pozo H-10 en la toba vítrea Los Humeros; los pozos H-19 y H-25 en la andesita de hornblenda, y el pozo H-27 en los basaltos, muy cerca del contacto con la andesita de hornblenda.

En general, se tienen temperaturas de hasta 403° C en el yacimiento de Los Humeros y las isothermas reflejan el ascenso de calor asociado con las fallas del mismo, lo cual da lugar a estratos calientes relativamente someros.

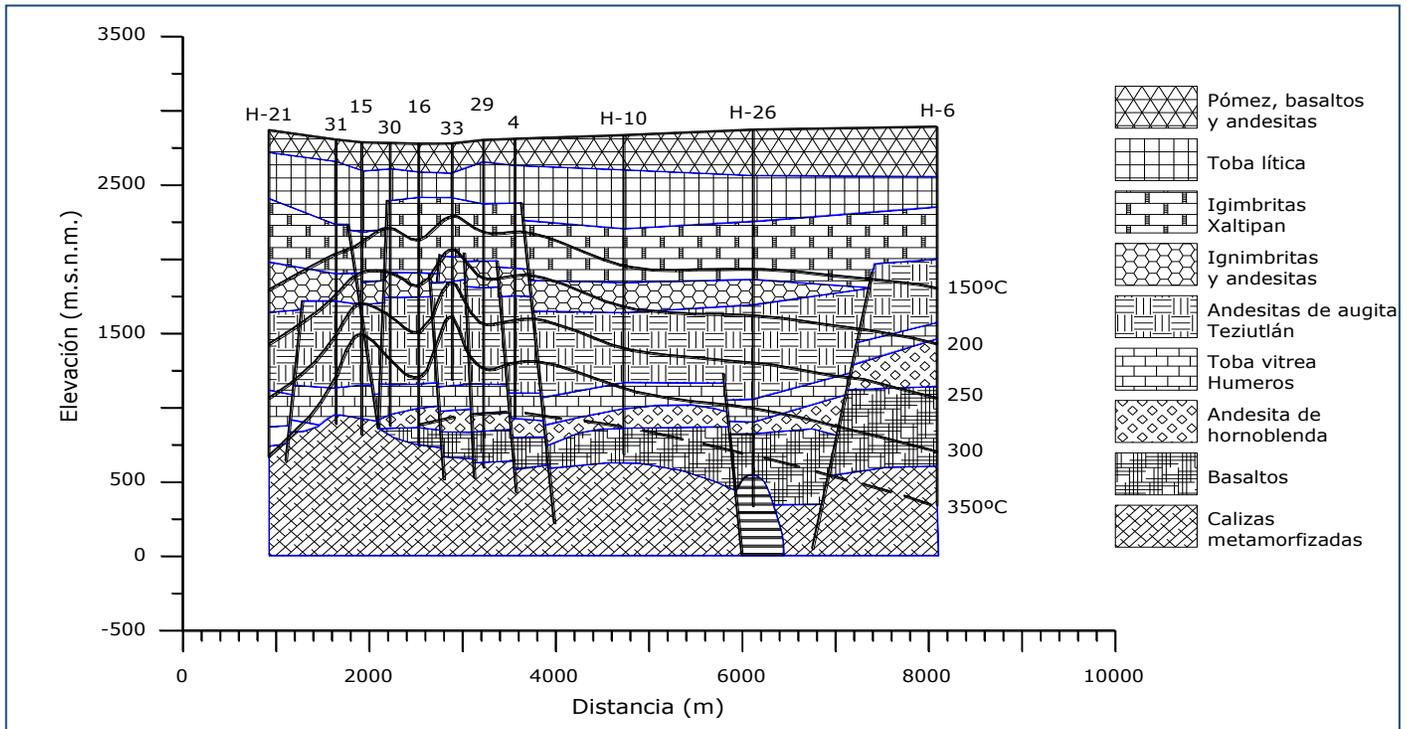


Fig. 4. Distribución de temperatura inicial en la sección geológica L3 (rumbo general NNW-SSE)

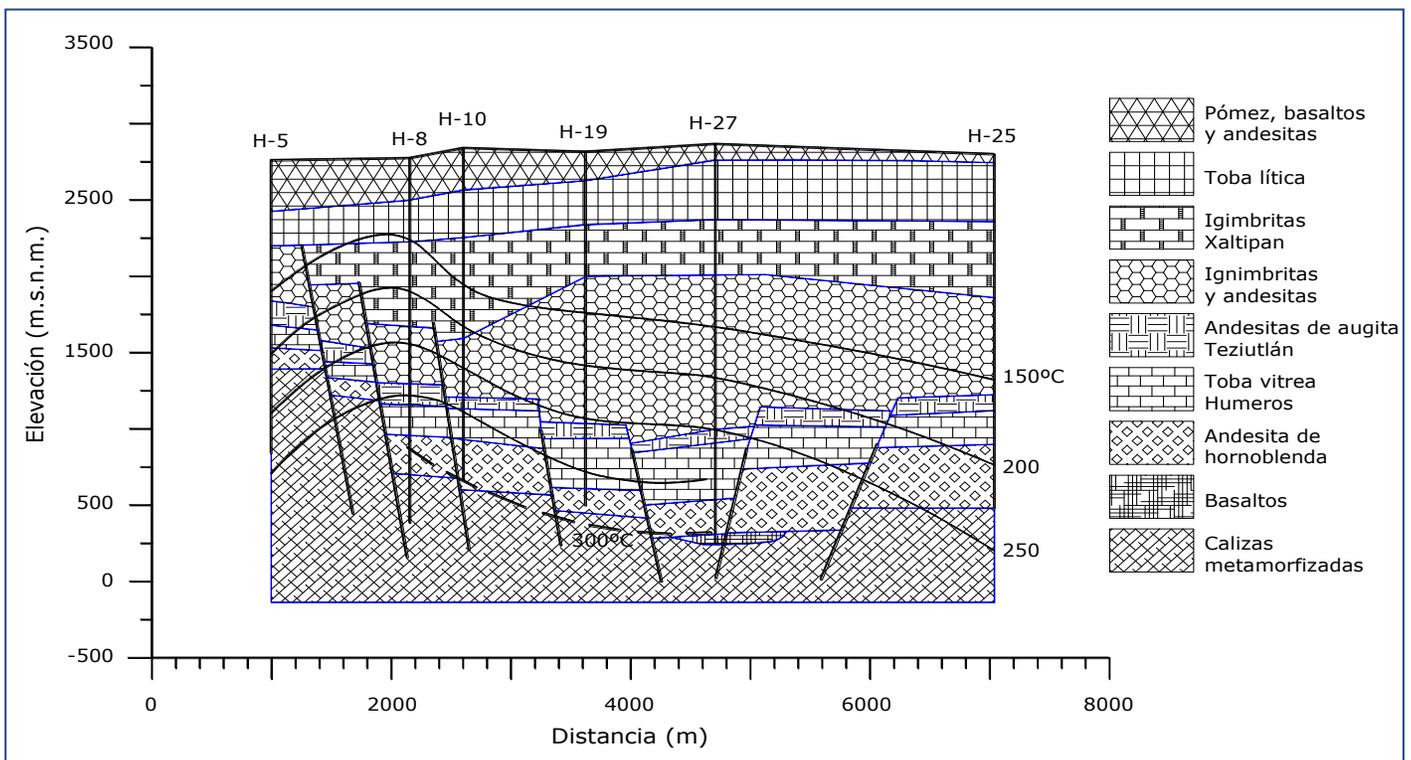


Fig. 5. Distribución de temperatura inicial en la sección geológica T2 (rumbo general W-E)

3. Detección de horizontes permeables

La detección de las principales zonas de alimentación de cada pozo se hizo con el fin de determinar la profundidad en que el pozo está en contacto directo con el yacimiento e inferir la temperatura más probable de la formación y determinar la curva de elevación-temperatura de yacimiento. La metodología seguida para identificar las zonas permeables de los pozos de Los Humeros se describe en Grant *et al.* (1982, 1984) y Arellano *et al.* (1998). La metodología aplicada en el presente trabajo para determinar las principales zona de aporte de los pozos de Los Humeros consistió en:

1° Preparar, para cada pozo, una gráfica que contiene:

- * la distribución espacial de las pérdidas de circulación,
- * la última serie de registros de temperatura,
- * las temperaturas estáticas estimadas mediante los métodos de Horner y de la esfera,
- * los registro(s) de calentamiento,
- * las unidades litológicas atravesadas,
- * un perfil de la velocidad de calentamiento (dT/dt) entre 2 registros de temperatura, y
- * el croquis de terminación del pozo.

2° Determinar las principales zonas de permeabilidad de cada pozo, correlacionando la cantidad relativa y profundidad de las pérdidas de circulación, las inflexiones de los registros de temperatura, la velocidad de calentamiento y las unidades litológicas en el intervalo de profundidades en que el pozo está en contacto con el yacimiento. Normalmente, la profundidad de la zona permeable principal indicada por las pérdidas y los registros coincide de cerca, pero no exactamente, con la profundidad indicada por la velocidad de calentamiento. Por otro lado, los pozos de Los Humeros presentan dos o más zonas de aporte, y la decisión sobre cuál es la zona permeable principal se basó en aplicar de forma conjunta los criterios relevantes a las pérdidas de circulación, las características de los registros y la velocidad de calentamiento.

3° Con la profundidad de la principal zona de aporte ya definida, se obtuvo la temperatura de yacimiento correspondiente empleando la información de las temperaturas estáticas y los registros de calentamiento, cuidando que estas temperaturas representaran lo más fielmente posible la temperatura del yacimiento y estuvieran libres de los efectos de convección o flujo interno en el pozo.

3.1 Principales zonas de alimentación de los pozos de Los Humeros

La Figura 6 muestra un ejemplo típico de las gráficas construidas para los 40 pozos de Los Humeros. Un resumen de los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología descrita arriba se presenta en la Tabla 1 para los pozos originales y reparados. Se incluye la temperatura de yacimiento, la elevación y la capa litológica (Arellano *et al.*, 1998) de cada pozo. Para los pozos originales, las elevaciones de las zonas permeables van desde -24 msnm (Pozo H-12) hasta 1610 msnm (Pozo H-33). Las temperaturas de yacimiento corresponden a las obtenidas con el método de la esfera y van desde 140° C (Pozo H-14) hasta 403° C (Pozo H-11). Las correspondientes temperaturas estimadas con método de Horner alcanzaron 365° C, pero no se incluyen en este trabajo.

Las altas temperaturas son consistentes con las temperaturas que se han medido en Los Humeros, que alcanzan hasta 418° C. Se observa también que las principales zonas permeables reportadas en la Tabla 1 se localizan en las andesitas de augita y en las calizas metamorfizadas (unidades litológicas 5 y 9), aunque para algunos pozos sus horizontes permeables se localizan en las andesitas de hornblenda y en los basaltos (unidades 7 y 8). También es notorio que los contactos entre pares diferentes de unidades litológicas

proporcionan un medio permeable para los pozos de Los Humeros. Los resultados en forma gráfica se reportaron en García *et al.* (2000a).

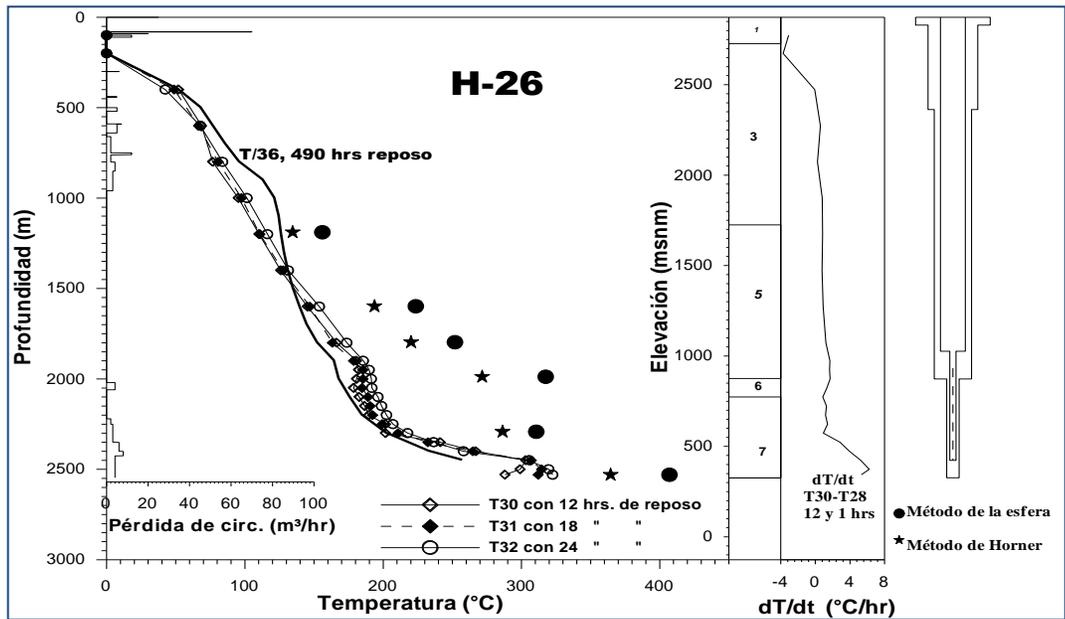


Fig. 6. Perfiles de temperatura, temperaturas estáticas y velocidades de calentamiento durante la perforación y terminación del pozo H26.

Pozo Núm.	Elevación (msnm)	Temp. Estabiliz. (° C)	Capa litológica No.	Pozo Núm.	Elevación (msnm)	Temp. Estabiliz. (° C)	Capa litológica No.
1	1410	240	5	18	100	332	9
1R	1013	267	5	19	540	325	7
2	675	342	9	20	535	370	6,7
2R	598	312	9	21	660	300	9
3	1255	315	5	22	1218	300	9
3R	1156	256	6	23	375	345	6
4	1210	314	5	24	100	308	9
5	1054	252	9	25	540	220	7
6	344	349	9	26	375	397	7
7	500	337	8	27	315	350	8
8	570	394	9	28	310	366	9
9	678	353	9	29	700	390	8
9R	1352	302	5	30	1320	300	5
10	1020	318	6	31	910	350	9
11	510	403	8	32	640	383	7
11R	1363	324	5	32	1290	317	5
12 (rev)	-24 (1050)	383 (330)	9 (7)	33	1610	300	5
13	434	330	9	34	1015	296	5
14	1440	140	9	35	1450	310	5
15	1396	322	5	36	1220	332	5
15R	1290	294	5	37	1240	290	5
16	790	364	8	38	600	335	9
17	663	322	7	39	400	340	9
17R	1122	315	5	40	600	279	7

Tabla 1. Temperaturas estabilizadas, elevación y capa litológica de pozos originales del campo geotérmico Los Humeros. Las temperaturas mostradas se obtuvieron con el método de la esfera.

3.2. Curva de elevación vs la temperatura de la zona principal de alimentación de los pozos

A partir de los resultados de la Tabla 1 se generó la curva de temperatura de yacimiento contra elevación. La Figura 7 muestra la distribución de temperatura estimada por el método de la esfera y su ajuste con el modelo PPEP (Perfil de Presión versus Profundidad). La línea llena representa el perfil de temperaturas correspondiente a una columna de agua en ebullición. Si no se consideran en la gráfica los pozos que tienen más dispersión y que probablemente se encuentran en el límite o fuera del yacimiento explotable (H-1, H-5, H-14, H-24 y H-25), puede observarse un agrupamiento de pozos entre 1000 y 1650 msnm que corresponde al yacimiento superior discutido anteriormente. Estos pozos tienen temperaturas medidas de producción entre 290 y 330° C, que concuerda razonablemente con las temperaturas estimadas (entre 300 y 330° C) para la columna en ebullición que se observa en el perfil de presión (Arellano *et al.*, 1998, Figura 9.2.1).

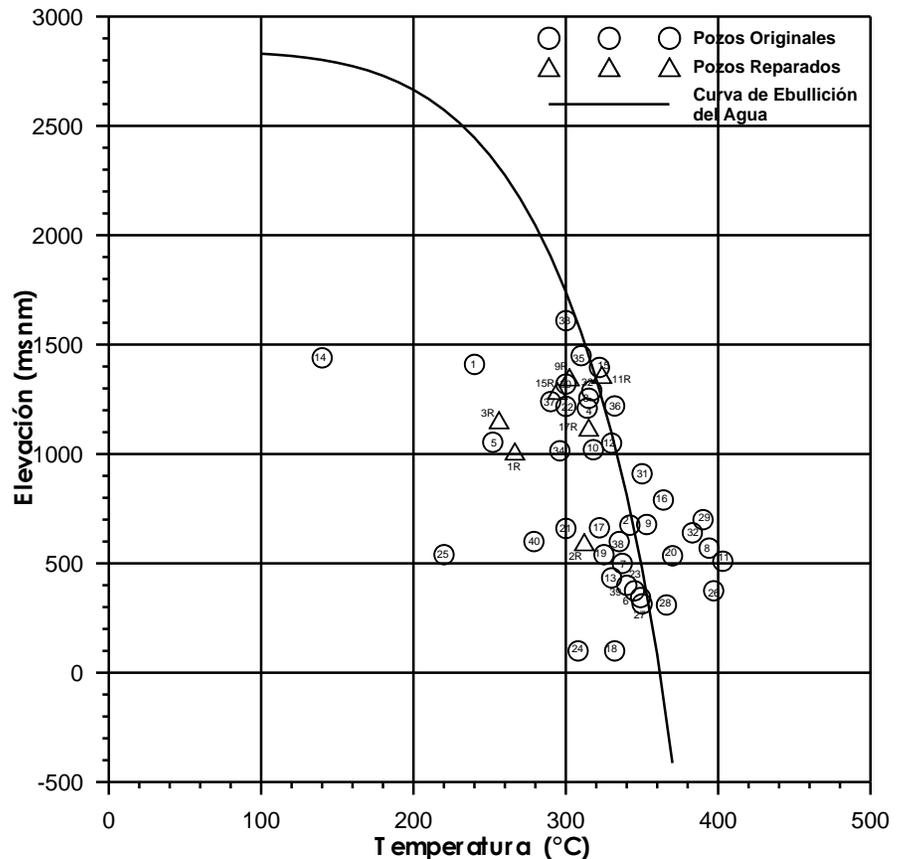


Fig. 7. Curva de ebullición del agua con la profundidad y temperaturas estáticas de pozos originales y reparados del campo Los Humeros.

Los resultados obtenidos para la distribución de temperatura concuerdan razonablemente con la imagen del yacimiento obtenida a partir de los datos de presión. Es decir, un yacimiento superior de líquido dominante y en la parte profunda un yacimiento de baja saturación de líquido, principalmente en la zona denominada Colapso Central. Los pozos que se encuentran en la parte inferior, a elevaciones de 900 a 0 msnm, muestran un rango de temperatura mayor, entre 300 y 400° C. Esto probablemente refleja en parte lo complejo del sistema geotérmico y, por otro lado, la dispersión mostrada en la Figura 7 se debe en parte a las limitaciones del método, el cual se ve afectado por todos los aspectos que tengan influencia en los perfiles de temperatura medidos (enfriamiento, ebullición, errores de medición, etc.) y que se emplearon como datos de entrada. Los pozos reparados se ubican entre 1000 y 1500 msnm de elevación, excepto el pozo H-2.

4. Conclusiones

Se estimaron las temperaturas estáticas de los 40 pozos del campo geotérmico de Los Humeros empleando los métodos de Horner y de la esfera. La técnica de Horner tiende a subestimar las temperaturas de formación, mientras que el método de la esfera da resultados más cercanos a las temperaturas reales de la formación, hecho que se soportó con la simulación del proceso de circulación y del retorno al equilibrio térmico de varios pozos. Se determinó la zona principal de aporte de fluido a cada pozo y la temperatura de dichas zonas. La distribución de temperatura del yacimiento indica que hay dos grupos de pozos: uno entre

1000 y 1500 msnm de elevación, con temperaturas entre 290 y 330° C, y otro más profundo, entre 0 y 1000 msnm, con temperaturas entre 330 y 400° C. Los pozos que se localizan en los límites o fuera del campo de Los Humeros se alejan notablemente de la curva de ebullición del agua. Los principales horizontes permeables se localizan principalmente en las andesitas de augita y en las calizas metamorfizadas, aunque algunos pozos tienen sus horizontes permeables en las andesitas de hornblenda y en los basaltos. La caliza metamorfizada es la unidad litológica de menor permeabilidad, pero buena cantidad de pozos se alimentan de esa zona del yacimiento. Finalmente, la distribución de temperatura en secciones geológicas permite determinar las partes del yacimiento donde existe ascenso de fluido caliente, también observado en el análisis de distribución de presión en el yacimiento.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a las autoridades del IIE por el apoyo para la elaboración de este trabajo.

Referencias

- Arellano, V., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón, D. Nieva, E. Portugal, e I. Torres, 1998. Desarrollo de un modelo básico actualizado del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue., Instituto de Investigaciones Eléctricas, Informe IIE/11/11459/01/F, 462 pp. Inédito.
- Arellano, V., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón, y A. Pizano, 1999. Modelo conceptual del estado inicial del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., México, *Geotermia*, Vol. 15, No. 2, pp. 111-120.
- Arellano, V., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón, y A. Pizano, 2000. A conceptual model of the Los Humeros (México), geothermal reservoir in its natural state. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, pp. 2503-2509.
- Ascencio, F., A. García, J. Rivera, y V. Arellano, 1994. Estimation of undisturbed formation temperatures under spherical-radial heat flow conditions. *Geothermics*, Vol. 23, No. 4, pp.317-326.
- Barragán, R.M., V. Arellano, D. Nieva, E. Portugal, A. García, A. Aragón, y R. Tovar, 1999. Geoquímica de gases del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., (México). *Geotermia*, Vol. 15, No.3, pp. 183-193.
- Barragán, R.M., V. Arellano, D. Nieva, E. Portugal, A. García, A. Aragón, R. Tovar, e I. Torres-Alvarado, 2000. Gas geochemistry of the Los Humeros geothermal field, Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, pp. 2527-2532.
- Campos, J.O., y F. Durán, 1986. Determinación preliminar del campo de temperaturas en Los Humeros, Pue., *Geotermia*, Vol. 2, No. 2, pp. 141-152.
- Dowdle, W.L., and W.M. Cobb, 1975. Static formation temperature from well logs – an empirical method. *Journal of Petroleum Technology*, November, pp. 1326-1330.
- García, A., G. Espinosa, P.R. Mendoza, E. Santoyo, y J.M. Morales, 1996. Desarrollo de un simulador para la interpretación de perfiles de temperatura en pozos geotérmicos. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Informe IIE/11/10747/I 01/F, 114 pp. Inédito.

- García, A., V. Arellano, A. Aragón, R.M. Barragán, G. Izquierdo, y A. Pizano, 2000(a). Distribución de temperatura inicial en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, *Geotermia*, Vol. 16, No.1-3, pp. 97-115.
- García, A., G. Espinosa, E. Santoyo, P.R. Mendoza, e I. Hernández, 2000(b). GEOTRANS: A computer code for estimating transient temperatures in the completion of geothermal wells with drilling fluid losses. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, pp. 4023-4028.
- Grant, M.A., I.G. Donaldson, and P.F. Bixley, 1982. *Geothermal Reservoir Engineering*, Academic Press, New York, 369 pp.
- Grant, M.A., S.K. Garg, and T.D. Riney, 1984. *Interpretation of downhole data and development of a conceptual model for the Redondo Creek area of the Baca geothermal field*. Applied Mathematics Division, Dept. of Scientific and Industrial Research, Wellington, New Zealand – S-Cubed, La Jolla, Cal., USA., Rept. No. 92038.
- Izquierdo, G., V. Arellano, A. Aragón, E. Portugal, e I. Martínez, 2000. Fluid acidity and hydrothermal alteration at the Los Humeros geothermal reservoir, Puebla, México. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, pp.1301- 1306.