

Evolución isotópica de fluidos de pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México

Rosa María Barragán Reyes
Enrique Portugal Marín
Víctor Manuel Arellano Gómez
Alfonso Aragón Aguilar

Instituto de Investigaciones Eléctricas, México

Fernando Sandoval Medina

Comisión Federal de Electricidad, México

Se interpretaron datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) de fluidos de pozos productores y de reinyección del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México, para definir la evolución del yacimiento y la ocurrencia de procesos físicos como resultado de la explotación. En el estudio se consideran datos de treinta pozos según el muestreo realizado en septiembre de 2000. El estudio de la evolución en el tiempo de las estimaciones de temperatura de yacimiento mediante diferentes técnicas, así como la temperatura obtenida de simulación de pozos, sugiere que ocurre ebullición en áreas localizadas en ambas zonas del campo debido a la explotación. Los resultados generales indican la existencia de diferentes fenómenos en ambas áreas del campo. En la parte sur se definen dos tendencias de comportamiento isotópico: una con pendiente positiva que indica mezcla de fluidos y en cuyo extremo enriquecido isotópicamente se encuentra el fluido de reinyección; la otra tendencia con pendiente negativa resulta de un proceso de ascenso y condensación parcial de vapor en el yacimiento a una temperatura mayor de 220 °C, ya que por encima de esta temperatura el deuterio se comporta como una especie volátil. En contraste, para la sección norte del campo no se encontró una tendencia bien definida, aunque algunos puntos parecen ajustarse a la relación de pendiente negativa hallada para la zona sur.

Palabras clave: campo geotérmico Los Azufres, geoquímica isotópica, fluidos geotérmicos, evolución, yacimientos.

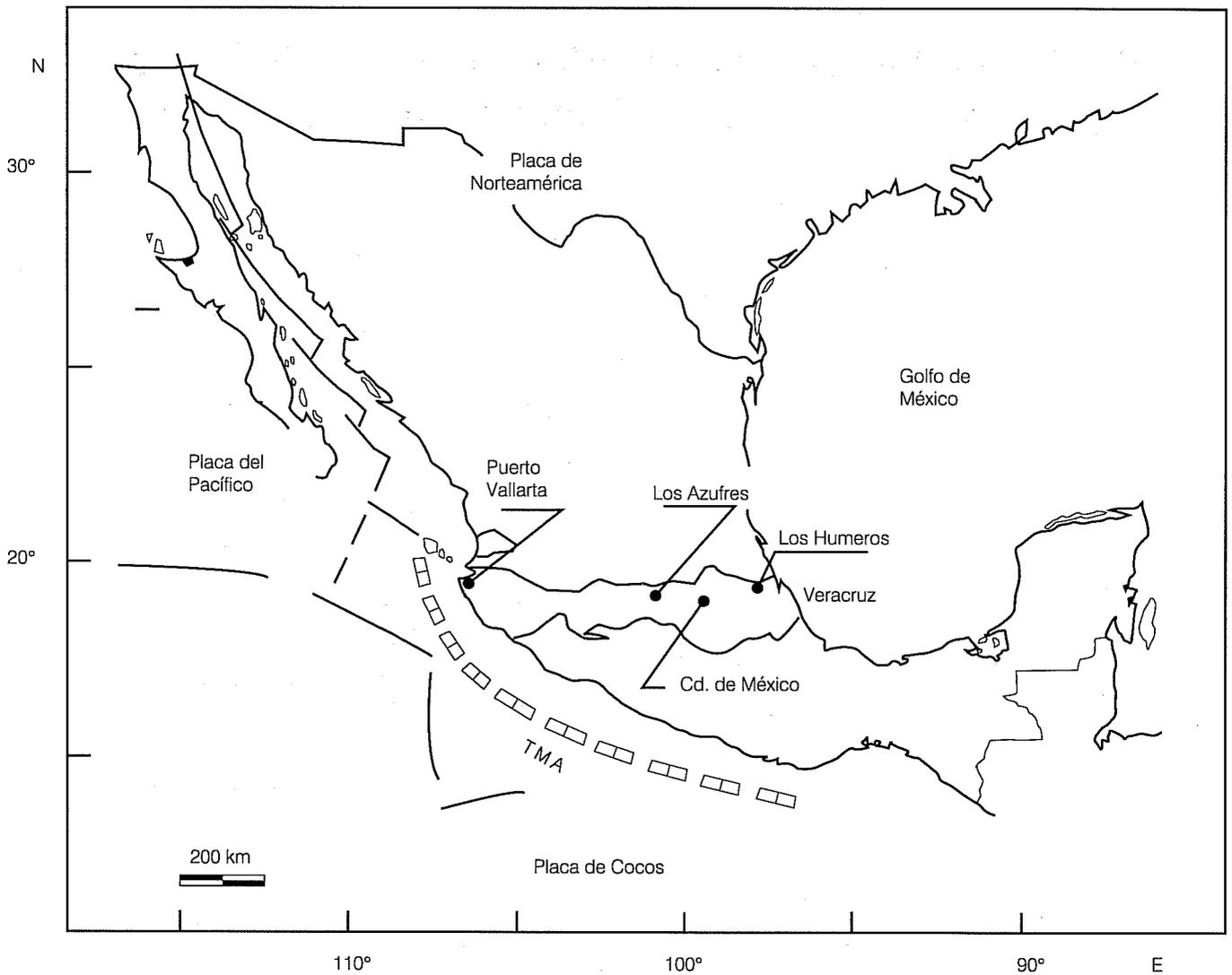
Introducción

El campo geotérmico de Los Azufres se localiza en el estado de Michoacán, México, en la porción norte del eje neovolcánico mexicano, a una elevación promedio de 2,800 metros sobre el nivel del mar (msnm) (ilustración 1). Se caracteriza por ser intensamente fracturado y producir fluidos bifásicos. Actualmente es el segundo campo geotérmico del país por su capacidad de generación eléctrica (88 MWe) (Torres Rodríguez y Flores

Armenta, 2000), la cual se está incrementando en 100 MWe más (Quijano León y Gutiérrez Negrín, 2000). Con base en las diferentes características de los fluidos producidos, el campo se divide en dos zonas: la norte (Marítaro) y la sur (Tejamaniles). La ilustración 2 presenta un mapa del campo con la localización de pozos.

De acuerdo con el modelo basado en ingeniería de yacimientos (Iglesias y Arellano, 1985), el campo geotérmico Los Azufres en su estado natural consiste de un acuífero extendido, donde el fluido ascendente

Ilustración 1. Localización del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán.



comienza a ebullición aproximadamente a 1,200 msnm. La región bifásica dominada por líquido se localizó entre 1,200 y 1,700 msnm, y a partir de tal elevación el vapor se convierte en la fase dominante. Esta región bifásica se extiende hasta aproximadamente 2,400 msnm, arriba de la cual se localizó una región de vapor seco o supercalentado. Debido a su carácter mixto, este yacimiento se definió como de tipo VAP-LIQ (Iglesias y Arellano, 1987).

El modelo geoquímico del yacimiento de Los Azufres —desarrollado durante las etapas iniciales de explotación— fue propuesto por Nieva *et al.* (1987). Dicho modelo tuvo como base fundamental la distribución

espacial de las especies químicas e isotópicas calculadas para la fase líquida del yacimiento. En la zona sur, la concentración de especies volátiles (CO_2) resultó ser más alta en los estratos más someros y la concentración de especies no volátiles (Cl, oxígeno-18) fue mayor a más profundidad (ilustraciones 3 y 4). Esta distribución química e isotópica del fluido se explicó mediante un modelo que establece la ocurrencia de procesos de ascenso y condensación parcial de vapor en el estado natural. Este proceso es dominante en el área sur del campo, donde la pendiente de la relación deuterio contra oxígeno-18 es negativa (ilustración 5). En contraste, en la zona norte, la misma relación isotópica produjo una pendiente positiva

Ilustración 2. Localización de pozos en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán.

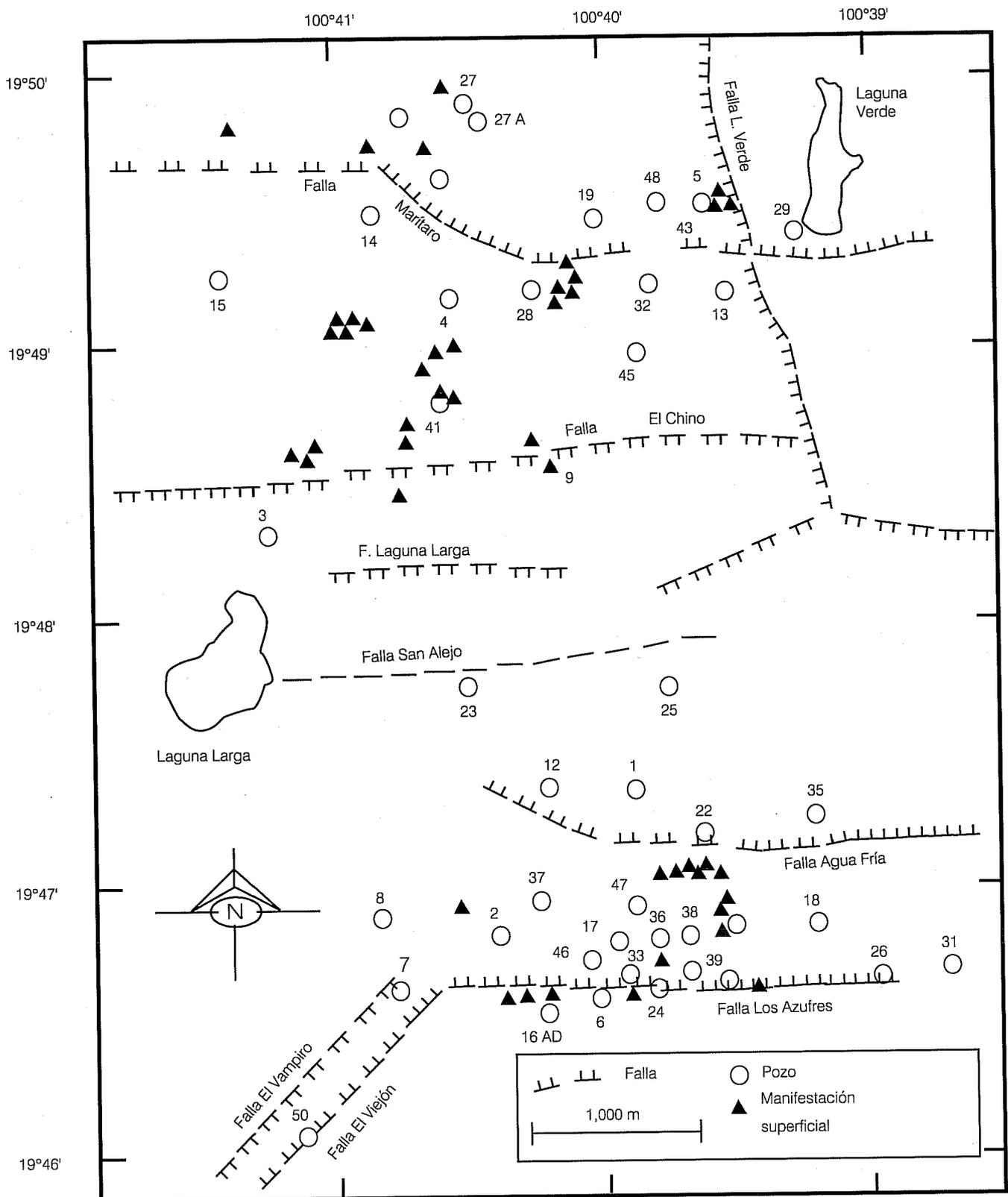


Ilustración 3. Distribución de contenido de CO₂ en el líquido del yacimiento contra la elevación de la zona productora.

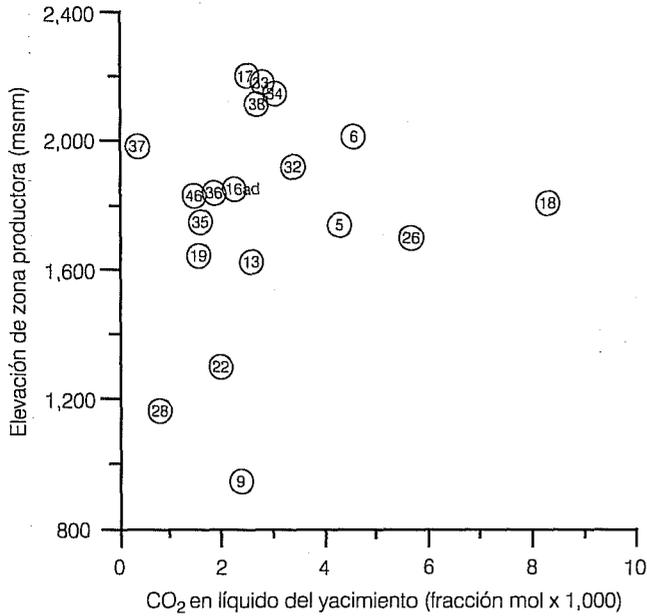


Ilustración 4. Distribución de oxígeno-18 en el líquido del yacimiento contra la elevación de la zona productora.

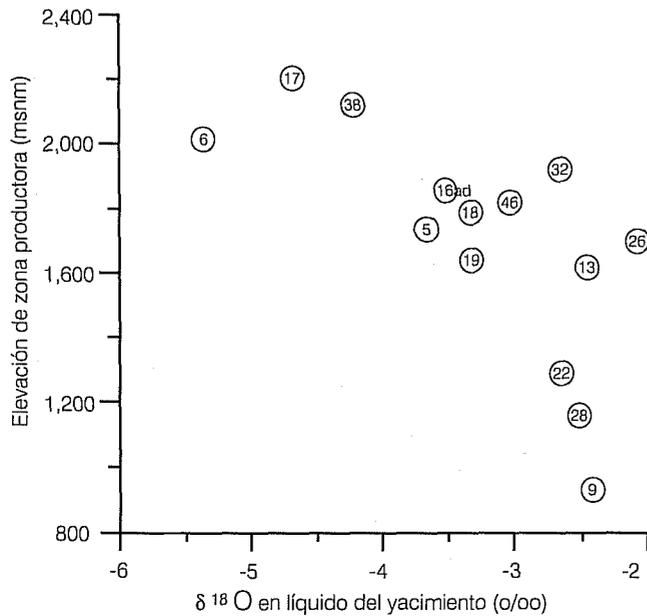
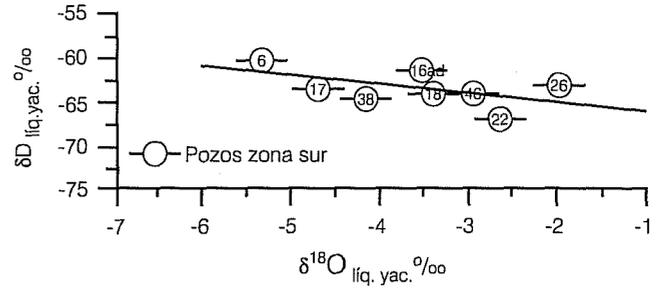


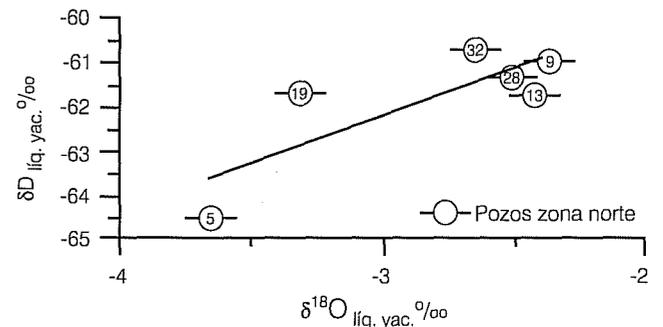
Ilustración 5. Deuterio contra oxígeno-18 en el líquido del yacimiento de pozos de la zona sur del campo.



(ilustración 6), lo que sugirió la presencia de dos diferentes fases líquidas con una composición isotópica ligeramente diferente. Como resultado del modelo se obtuvieron parámetros de composición química e isotópica para el fluido del yacimiento no perturbado que han constituido una valiosa referencia en estudios posteriores durante la explotación del campo.

En la actualidad se han realizado diversos estudios sobre los efectos de la reinyección en el yacimiento de Los Azufres, entre los que destacan los de Suárez *et al.* (1990), Gutiérrez y Suárez (1992), Suárez *et al.* (1995), Barragán *et al.* (1997), Torres Rodríguez y Flores Armenta (2000), y Barragán *et al.* (2001a, b). Torres Rodríguez y Flores Armenta (1998) estimaron el descenso de presión en el yacimiento a consecuencia de la explotación y encontraron que en la zona sur la caída de presión es mayor que en la norte; esto se debe a que la utilización del yacimiento se incrementa en la parte sur. Los autores también concluyeron que existe una transición de líquido a vapor en la mayoría de pozos del campo, como consecuencia de la disminución de presión. En general, los autores establecen que el incremento de cloruros y la

Ilustración 6. Deuterio contra oxígeno-18 en el líquido del yacimiento de pozos de la zona norte del campo.



disminución de temperaturas de yacimiento se debe al fenómeno de interferencia de fluidos de reinyección en la sección sur del campo.

Desde 1994, la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, la Residencia de Los Azufres (ambos de la Comisión Federal de Electricidad, CFE) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), a través de la Gerencia de Geotermia, han efectuado el monitoreo de especies isotópicas (oxígeno-18 y deuterio) en fluidos de pozos productores y de reinyección en el campo de Los Azufres, con el propósito de apoyar las políticas de explotación del recurso geotérmico.

El objetivo de este trabajo es establecer los actuales patrones de comportamiento isotópico de los fluidos producidos por los pozos, así como explicar las variaciones encontradas en relación con el estado natural del yacimiento como consecuencia de la extracción y reinyección de fluidos.

Marco geológico

El emplazamiento del centro volcánico Los Azufres está íntimamente ligado con la evolución del cinturón volcánico mexicano. Dicho territorio volcánico se localiza en la intersección de dos elementos morfoestructurales: la depresión central Chapala-Cuitzeo, prolongada hasta Maravatío, Michoacán, y la prolongación del sistema de cuencas y sierras (Garduño, 1987). Varios autores han estudiado la geología de la zona de Los Azufres (Cathelineau *et al.*, 1987; Dobson y Mahood, 1985; Gutiérrez y Aumento, 1982), la cual puede describirse de la siguiente forma:

1. El basamento local consiste de una secuencia de andesitas y basaltos, con interestratificación de flujo de lavas y en menor grado de materiales piroclásticos. A las andesitas se les atribuye una edad correspondiente al periodo del Mioceno tardío-Plioceno reciente (Venegas *et al.*, 1985).
2. Una serie ácida sobreyace las andesitas en la parte principal del campo geotérmico; esta serie consiste de riodacitas, riolitas y dacitas con edades de entre 1 y 0.15 millones de años.

Origen de los fluidos

Giggenbach y Quijano (1981) realizaron un estudio isotópico para definir el origen de los fluidos de Los Azufres y sugirieron la existencia de paleoaguas en el yacimiento. Los fluidos geotérmicos localizados en ambientes de tipo volcánico están constituidos por una mezcla de aguas meteóricas y "agua andesítica" en una

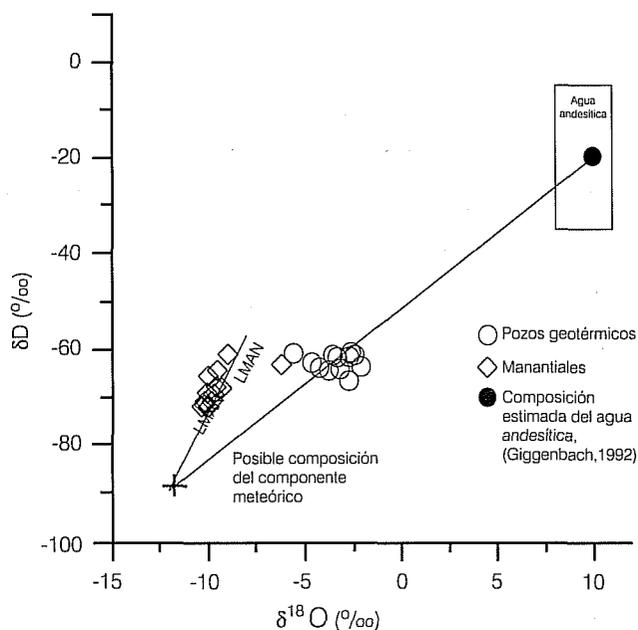
cierta proporción (Giggenbach, 1992). La ilustración 7 muestra la relación entre la composición isotópica de los fluidos geotérmicos en su estado natural y el "agua andesítica". Se han incluido datos isotópicos de algunos manantiales localizados en el campo, los cuales se alinean muy cerca de la línea meteórica correspondiente a América del Norte (Gat, 1980). El punto de intersección de la curva aguas geotérmicas-agua andesítica, con la línea meteórica correspondiente a América del Norte provee la posible composición isotópica del componente meteórico presente en los fluidos del yacimiento, siendo $-11.8\delta^{18}\text{O}$ y $-88\delta\text{D}$ (Barragán *et al.*, 1999). Esta composición es muy ligera, considerando el resultado de los fluidos actuales, por lo que el componente meteórico presente corresponde a aguas antiguas. De acuerdo con la metodología propuesta por Giggenbach (1992), para el cálculo de la fracción de "agua andesítica" presente en los fluidos de Los Azufres, ésta se ha estimado en 0.42 (Barragán *et al.*, 1999).

Metodología

Muestreo y análisis

El muestreo de pozos productores se realiza bajo condiciones controladas de operación y es función de las características termodinámicas de los pozos, por lo

Ilustración 7. Deuterio contra oxígeno-18 de los fluidos del yacimiento de Los Azufres en su estado natural y su relación con agua andesítica y manantiales. LMAN significa línea meteórica para América del Norte.



cual es posible coleccionar tanto agua separada y vapor condensado o sólo vapor, mientras que en los pozos reinyectores se colecciona agua de reinyección. Las muestras se coleccionan en botellas de 30 ml provistas de tapa hermética. En el agua separada se miden parámetros *in situ*, como temperatura de muestreo, pH y conductividad eléctrica.

Los análisis de oxígeno-18 y deuterio se realizaron en el Laboratorio de Isotopía de la Gerencia de Geotermia del IIE, mediante espectrometría de masas.

Método de cálculo de composición isotópica de la descarga total

La descarga total de los pozos constituye el fluido ascendente por la tubería antes de que ocurra la separación de fases. La composición isotópica de este fluido debe calcularse a partir de los datos analizados en las fases separadas (líquido y vapor) de acuerdo con procedimientos descritos por Nieva *et al.* (1987). Cuando un pozo produce sólo fase vapor, la composición isotópica del vapor coleccionado es igual a la composición de la descarga total. El procedimiento usado se describe a continuación.

Se utiliza el dato de composición isotópica de la fase líquida analizada $(\delta_i)_{LS}^{TSMV}$. A partir de ésta se calcula la composición del vapor separado $(\delta_i)_{VS}^{TSMV}$, utilizando los valores de los coeficientes de partición de las especies isotópicas, en función de la temperatura (Truesdell *et al.*, 1977) y la ecuación 1:

$$(\delta_i)_{VS}^{TSMV} = (\delta_i)_{LS}^{TSMV} - 10^3 \ln(\alpha_i)^{TSMV} \quad (1)$$

En la mayoría de los casos, la muestra de líquido separado se toma a una temperatura de separación correspondiente a la presión atmosférica, mientras que la de vapor se colecciona a una temperatura mayor; por tal motivo, para reconstruir la composición isotópica de la descarga total se deben considerar las dos etapas de separación. En la primera se calcula la composición de la fase líquida a la temperatura de separación de la muestra de vapor mediante la siguiente expresión:

$$(\delta_i)_{LS}^{TSMV} = y'(\delta_i)_{VS}^{TSMV} + (1-y')(\delta_i)_{LS}^{TSMV} \quad (2)$$

donde y' (fracción de vapor) puede calcularse fácilmente a partir de un balance de entalpía de acuerdo con la expresión 3:

$$y' = \left(H_{VS}^{TSMV} - H_{LS}^{TSMV} \right) / \left(H_{VS}^{TSMV} - H_{LS}^{TSMV} \right) \quad (3)$$

En la segunda etapa se sustituye la composición isotópica del vapor $(\delta_i)_{VS}^{TSMV}$ en la ecuación 4, que corresponde a la composición de la descarga total:

$$(\delta_i)_{DT} = y(\delta_i)_{VS}^{TSMV} + (1-y)(\delta_i)_{LS}^{TSMV} \quad (4)$$

donde y se obtiene efectuando un nuevo balance de entalpía entre las condiciones del cabezal y las de la primera separación, de acuerdo con la ecuación 5:

$$y = \left(H_{DT} - H_{LS}^{TSMV} \right) / \left(H_{VS}^{TSMV} - H_{LS}^{TSMV} \right) \quad (5)$$

Resultados

Identificación de fenómenos de yacimiento

La existencia de procesos físicos en el yacimiento se determinó mediante la comparación de valores estimados de temperatura de yacimiento respecto al tiempo, de acuerdo con la metodología propuesta por Truesdell *et al.* (1995). Dichas estimaciones se refieren a los valores calculados por los geotermómetros de composición catiónica (T_{CCG}) (Nieva y Nieva, 1987) y el de sílice T_{SiO_2} (Fournier y Potter II, 1982), a los obtenidos de la entalpía del cabezal (T_{ENT}) y a los determinados por el simulador de flujo y calor en pozos WELFLO, T_{SIM} (Goyal *et al.*, 1980). El valor producido mediante el geotermómetro CCG se interpreta como la temperatura "lejos de la zona productora del pozo" gracias al lento reequilibrio químico-mineral de las especies químicas participantes (Na^+ y K^+) después de un cambio de condiciones térmicas. Por otro lado, el valor de T_{SiO_2} indica la temperatura "cerca del pozo" por su rápida cinética de equilibrio. La temperatura procedente del simulador de pozos indica la temperatura del fluido a la entrada del pozo y es normalmente menor o igual a la temperatura T_{SiO_2} . Finalmente, T_{ENT} es la temperatura proveniente de la entalpía del fluido en la descarga. Este parámetro provee la estimación de temperatura del fluido si el yacimiento estuviera constituido sólo de fase líquida. Si la entalpía de producción de un pozo es muy alta, denota la existencia de fluido bifásico en el yacimiento.

Una relación de las interpretaciones más importantes se presenta en forma resumida en el cuadro 1, en donde además se incluyen los pozos que se ajustan a cada uno de los patrones observados en 1999.

Cuadro 1. Patrones característicos actuales de las estimaciones de temperaturas de yacimiento de acuerdo con Truesdell et al. (1995), fenómenos físicos que los originan y pozos en los que se identifican.

Patrón característico	Fenómeno físico	Pozos
$T_{ENT} > T_{SiO_2} = T_{CCG}$	Ebullición en el yacimiento	AZ-16AD, AZ-22, AZ-26 AZ-28, AZ-43, AZ-48, AZ-56, AZ-62
$T_{ENT} = T_{SiO_2} > T_{CCG}$	Entrada de agua de menor temperatura	AZ-2, AZ-4
$T_{ENT} >> T_{CCG} >> T_{SiO_2}$	Condensación en el pozo	AZ-5
$T_{ENT} >> T_{CCG} >> T_{SiO_2}$	Ebullición localizada cerca del pozo	AZ-13, AZ-18, AZ-32 AZ-36
$T_{ENT} >> T_{SiO_2} > T_{CCG}$	Entrada de agua de menor temperatura y segregación de fases en el yacimiento	AZ-33, AZ-46

De acuerdo con este método, los procesos más importantes identificados en el campo son: a) procesos de ebullición en el yacimiento y cerca de la zona productora de los pozos y b) recarga de agua de menor temperatura a la formación.

Los procesos de ebullición (en el yacimiento y cerca del pozo) se encontraron en ambas zonas del campo. En la parte norte se tiene el territorio más extenso, que incluye el fluido de los pozos AZ-13, AZ-28, AZ-48, AZ-43 y AZ-32, mientras que al sur, el área de ebullición involucra el fluido de los pozos AZ-16AD, AZ-22, AZ-18, AZ-26 y AZ-36. La ilustración 8 presenta el comportamiento de los valores de temperatura respecto al tiempo para el pozo AZ-22, el cual es el más representativo de este patrón de ebullición ($T_{ENT} > T_{SiO_2} = T_{CCG}$). La invasión de agua de menor temperatura a la zona productora de los pozos es un proceso que afecta en menor grado a los fluidos del campo. El fluido de los pozos AZ-2, AZ-4, AZ-33, AZ-16 y AZ-46 presenta un comportamiento característico de este patrón. El primer tipo se identificó a partir del indicador $T_{ENT} = T_{SiO_2} > T_{CCG}$ (ilustración 9, caso del pozo AZ-4) y el segundo cuando $T_{ENT} >> T_{SiO_2} > T_{CCG}$, donde T_{CCG} indica la temperatura del fluido antes de haberse calentado por la roca. El hecho de que la temperatura obtenida por medio de la entalpía sea muy alta indica que existe segregación de fases en la formación con flujo preferencial de vapor a la zona de producción del pozo. Los pozos que presentan este patrón (AZ-33 y AZ-46) están muy afectados por la reinyección. En la ilustración 10 se presenta el patrón de estimaciones de temperatura del pozo AZ-33.

Finalmente, un caso particular es el que presenta el pozo AZ-5, cuyas relaciones de temperatura se ajustan al

indicador $T_{ENT} >> T_{CCG} >> T_{SiO_2}$, el cual indica la existencia de procesos de condensación en el pozo (ilustración 11).

El fenómeno de ebullición en el yacimiento y cerca de los pozos ocurre como consecuencia de la explotación por la disminución de presión en el yacimiento. Este fenómeno es el responsable de la evolución de los fluidos

Ilustración 8. Patrón de estimaciones de temperatura de yacimiento contra el tiempo en el pozo AZ-22, en el que actualmente se indica la ocurrencia de ebullición en el yacimiento.

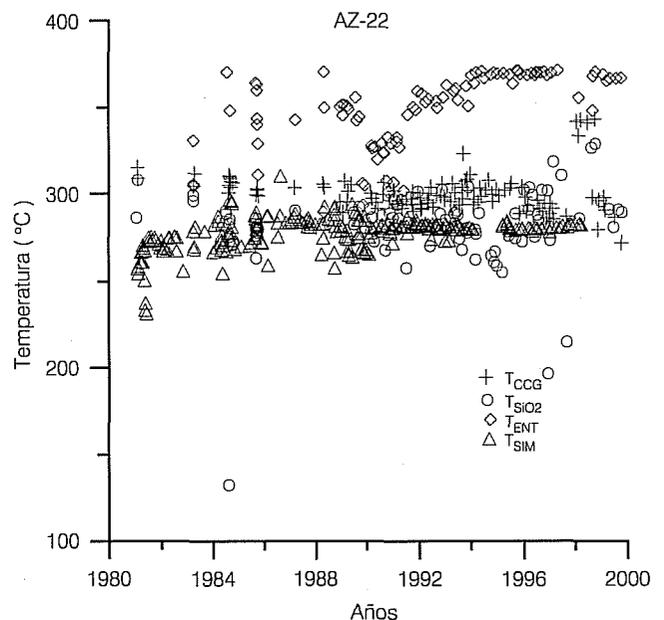


Ilustración 9. Patrón de estimaciones de temperatura de yacimiento contra el tiempo en el pozo AZ-4, en el que se infiere la entrada de agua de menor temperatura.

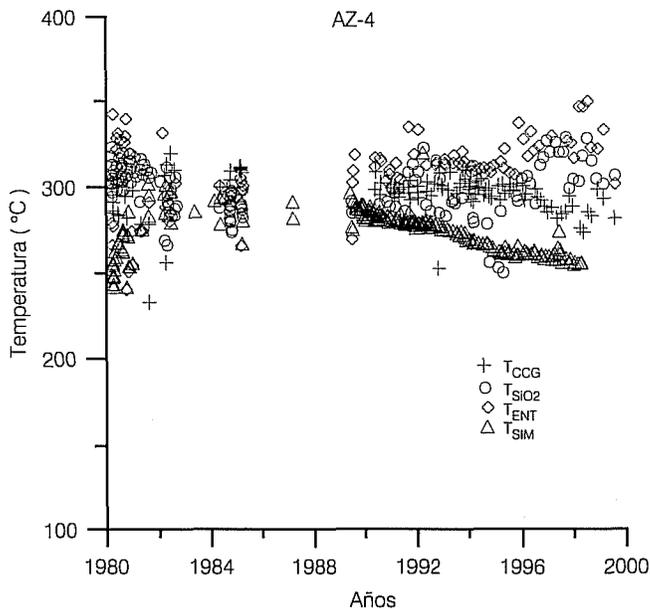


Ilustración 11. Patrón de estimaciones de temperatura de yacimiento contra el tiempo en el pozo AZ-5, en el que se infieren fenómenos de condensación en la tubería del pozo. Los valores de entalpía de la descarga total son muy altos después de 1993, por lo que no es posible interpolarse los correspondientes valores de temperatura, suponiendo existencia de fase líquida en el yacimiento.

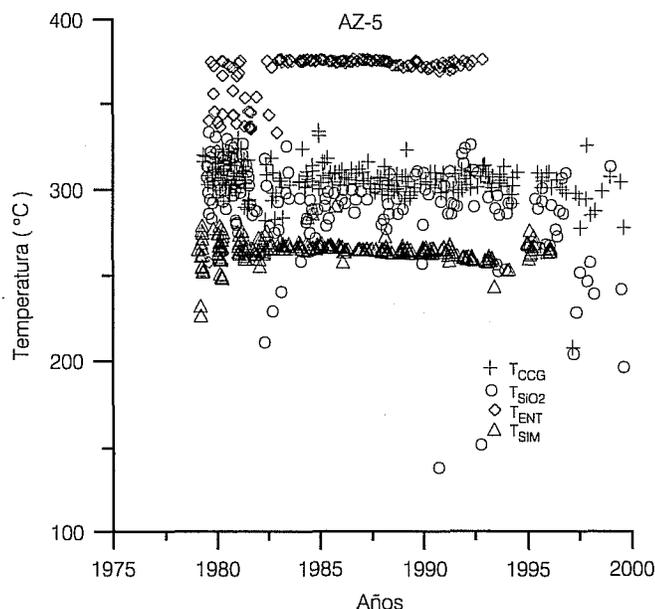
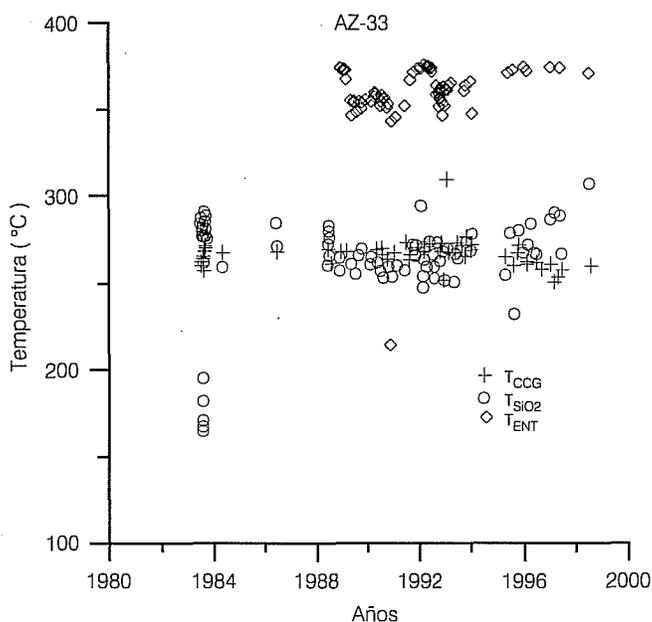


Ilustración 10. Patrón de estimaciones de temperatura de yacimiento contra el tiempo en el pozo AZ-33, en donde se aprecia la entrada de fluidos de reinyección.



desde fase líquida a vapor, como se observa en la ilustración 12 donde se ha graficado la presión del yacimiento contra la entalpía de fondo para el caso del pozo AZ-13

La ilustración 13 presenta un diagrama en planta donde se muestran los dos procesos más importantes que ocurren en el campo (ebullición e invasión de agua de menor temperatura). En el diagrama también se ilustra la zona de vapor localizada en los estratos someros tanto para la parte norte como sur del campo. El área de inyección se localiza al oeste de los pozos productores; en el diagrama se muestra la sección de influencia del fluido. En la zona sur, los pozos más afectados son AZ-2, AZ-46 y AZ-16, mientras que en la norte, el área de invasión de agua se ubica cerca de la parte de inyección, sin embargo sus alcances serán discutidos en secciones posteriores.

Isotopía estable

La distribución de los datos isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD del fluido de los pozos de la zona sur se muestra en la ilustración 14, en donde además se incluye el trazo de la línea de ajuste que indica el comportamiento isotópico

Ilustración 12. Diagrama termodinámico presión de fondo contra entalpía de fondo donde se muestra la curva de saturación del agua y la evolución del fluido del pozo AZ-13 desde fase líquida a vapor.

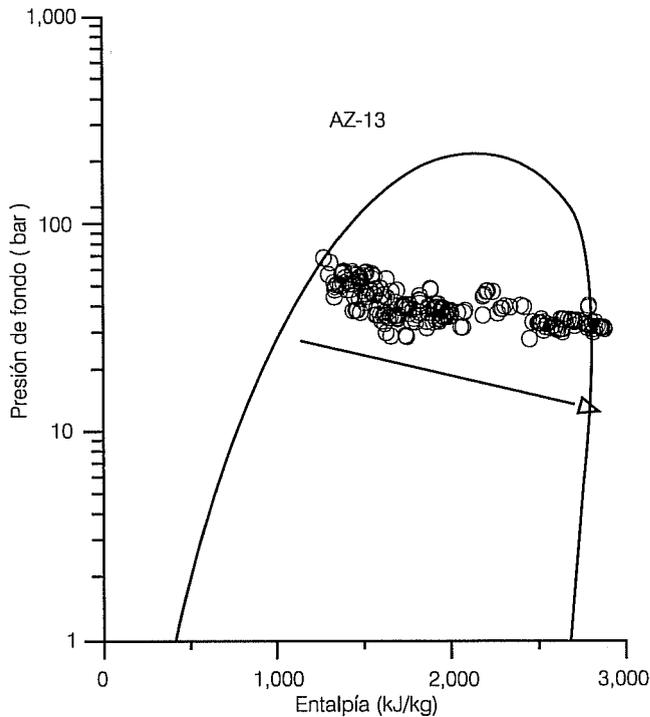


Ilustración 13. Localización de los principales procesos físicos en el campo.

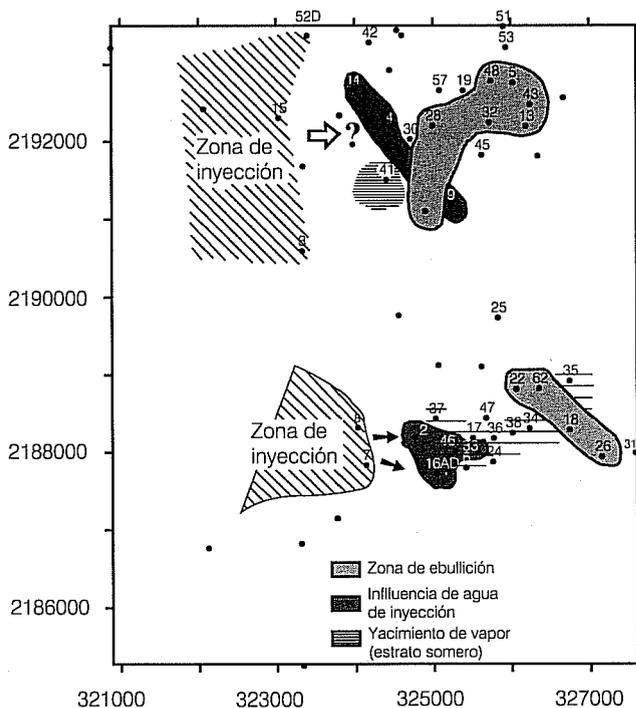
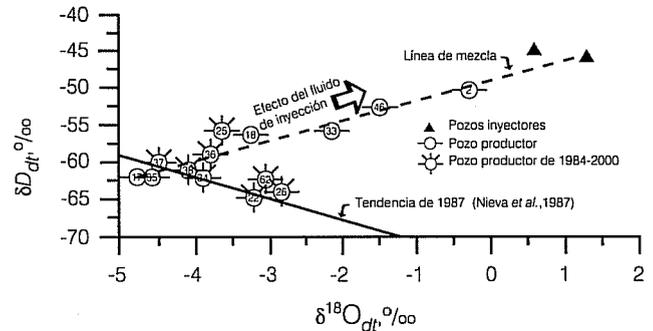


Ilustración 14. Deuterio contra oxígeno-18 de la descarga total de fluidos de pozos de la zona sur, según datos de septiembre de 2000.

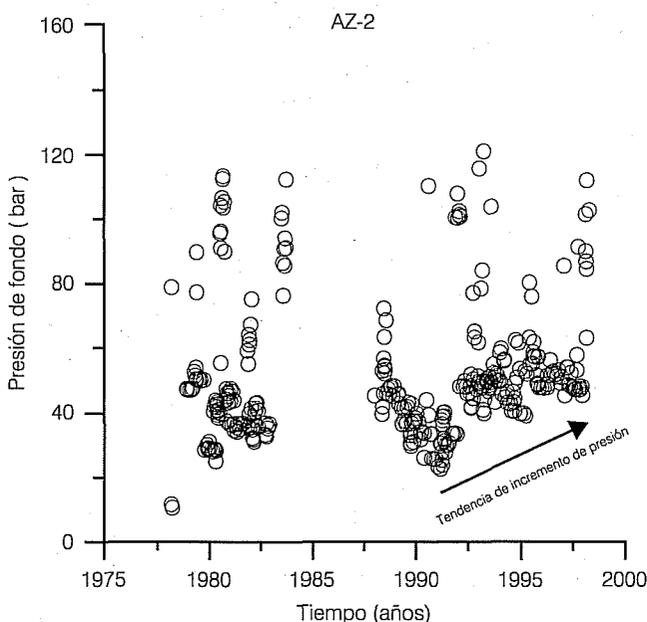


del fluido para la misma área, el cual —como se expuso en párrafos anteriores— se obtuvo durante las primeras etapas de explotación del campo (Nieva *et al.*, 1987). Los pozos que han mantenido su producción desde entonces se distinguen con una cruz, además del círculo usado en la ilustración para identificar el resto de los pozos. Ya que los datos isotópicos recientes corresponden únicamente a las condiciones de la descarga total del fluido, la reconstrucción de los datos para calcular los valores en el líquido del yacimiento implicaría considerar el exceso o déficit de vapor formado por la descompresión del sistema. El efecto observado en los datos de 1987 por esta corrección ocasionó que los valores de la descarga total se desplazaran aproximadamente en promedio 0.2 y 0.1% para oxígeno-18, ya sea el caso de un exceso o déficit de vapor, respectivamente. Esto, para efecto de una primera aproximación, no representa una diferencia significativa que impida llevar a cabo una relación de los grupos de valores. Por tanto, la dispersión que se muestra de los datos de los pozos AZ-62, AZ-26, AZ-17 y AZ-35 de la línea de 1987 se debe más bien a un proceso diferente, que puede estar relacionado con las condiciones termodinámicas de producción del pozo, lo cual afecta la relación del fraccionamiento isotópico. En términos generales, la distribución de los datos actuales (mostrada en la ilustración) refleja claramente que el fenómeno de ascenso y condensación propuesto por Nieva *et al.* (1987) aún prevalece y continúa gobernando el comportamiento hidrodinámico del fluido, principalmente en aquellos pozos cuya zona productora se encuentra en los estratos someros del campo. Sin embargo, el agua inyectada por la CFE hacia los estratos profundos ha interactuado con el fluido producido por algunos pozos, ocasionando cambios en su composición isotópica, tal es el caso de los pozos AZ-2, AZ-46 y AZ-16 (no graficado en la

ilustración). Los valores isotópicos de estos fluidos ahora son más enriquecidos siguiendo una tendencia de mezcla indicada por la línea segmentada en la ilustración 14, la cual tiene en uno de sus extremos los valores del agua de inyección. De acuerdo con los datos isotópicos, el fluido de los pozos AZ-33, AZ-18 y AZ-25 también se alinea a esta trayectoria inducida por el fluido de inyección. Al considerar como casos extremos la composición obtenida en 1987 (tendencia 1987) y el valor promedio del fluido de inyección, un simple balance isotópico revela que el fluido producido por los pozos AZ-2 y AZ-46 está compuesto de 76 y 51% de agua de inyección, respectivamente. El arribo de agua en las secciones productoras de los pozos produce invariablemente un incremento en los valores de presión, ya que los huecos dejados por el fluido extraído vuelven a llenarse (Grant *et al.*, 1982; Rivera, 1995).

La ilustración 15 presenta para el pozo AZ-2 la evolución de la presión del yacimiento calculada mediante la simulación numérica a partir del simulador de flujo de calor y fluidos WELFLO (Goyal *et al.*, 1980) respecto al tiempo. En la ilustración, los aumentos bruscos indican el arribo de fluidos en forma intermitente; la tendencia dada por el grueso de puntos indica la disposición de la presión, la cual se ha incrementado gradualmente en la década de los noventa hasta en cuarenta bar.

Ilustración 15. Gráfica presión de fondo contra tiempo para el pozo AZ-2.

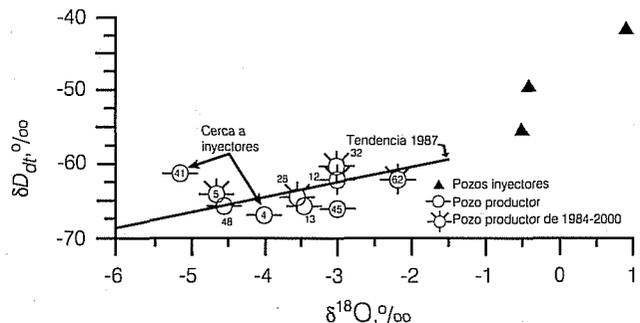


Zona norte

La distribución isotópica de oxígeno-18 y deuterio de los fluidos de la zona norte del campo se presenta en el diagrama $\delta^{18}\text{O}$ versus δD , el cual muestra un comportamiento diferente al encontrado en la región sur (ilustración 16). Los puntos se alinean en una pendiente positiva, donde los fluidos de los pozos AZ-5, AZ-48 y AZ-9 representan los puntos extremos. En la ilustración 16 también se ha graficado la línea de ajuste obtenida en 1987 (Nieva *et al.*, 1987) y al igual que en la ilustración 14, los pozos que han estado produciendo desde 1984 se identificaron con una cruz adicional. La distribución de los datos de septiembre 2000 en la gráfica de la ilustración 16 respecto a la línea de referencia (1987) indica que la tendencia de mezcla propuesta por Nieva *et al.* (1987) aún prevalece, conservándose, además, la localización de los puntos de los pozos AZ-5 (valor más negativo) y AZ-9 (más enriquecido) en el diagrama de la ilustración 16.

La composición isotópica del fluido de inyección presenta valores muy positivos (triángulos rellenos en la ilustración 16). De acuerdo con estos datos es evidente que el fluido de inyección no afecta la composición isotópica de los pozos más cercanos geográficamente, como es el caso del AZ-9, AZ-41 y AZ-4. Estos pozos presentan una composición isotópica muy ligera en relación con los fluidos de reinyección, por lo que se ubica en el extremo opuesto del diagrama, lejos de cualquier influencia del fluido inyectado. Mientras que el pozo AZ-9 —localizado cerca de los valores del agua de inyección— aparentemente no es afectado por el fluido de inyección, ya que su composición isotópica ha permanecido relativamente estable desde 1984.

Ilustración 16. Deuterio contra oxígeno-18 de la descarga total de fluidos de pozos de la zona norte, según datos de septiembre de 2000.



Variación de N_2 en la descarga total

Suárez *et al.* (1990) efectuaron un análisis del efecto de la reinyección en los pozos productores de las dos zonas del campo. En su estudio observaron un incremento en la concentración de sales, así como en argón y nitrógeno en los fluidos producidos por pozos cercanos a los pozos reinyectores AZ-7 y AZ-8 en la zona sur del campo. El aumento de argón y nitrógeno está relacionado con la inyección de la mezcla agua-aire al yacimiento. El agua, al entrar en contacto con la roca caliente, se evapora, mientras que el aire es arrastrado hacia la red de fracturas y fallas, alcanzando las zonas productoras de los pozos. El análisis de datos actuales (1999-2000) de la fase gaseosa (Barragán *et al.*, 2000; 2001b, c) muestra que la composición relativa del sistema N_2 -Ar-He se ha modificado en las descargas de pozos que reciben fluidos de reinyección, como se ve en la ilustración 17, donde se presenta un diagrama triangular para los mencionados componentes (propuesto por Giggenbach, 1992). De acuerdo con la ilustración, las descargas de pozos de la región sur (AZ-17, AZ-36, AZ-37, AZ-38 y AZ-46, entre otros) producen fase vapor con un gran componente meteórico. Dada la cercana ubicación del pozo AZ-41 a los fluidos meteóricos, no se descarta el arribo de fluido saturado con aire atmosférico a las zonas productoras de pozos de la zona norte, sin embargo parece ser un hecho aislado.

Debido a la explotación, los gases no condensables se han incrementado principalmente en la zona sur del campo (Suárez *et al.*, 1995; Barragán *et al.*, 2001b). Este fenómeno se debe a la influencia del nitrógeno y otros gases atmosféricos presentes en el aire que acompañan la reinyección.

Discusión

Los fenómenos fisicoquímicos identificados en el campo, así como los cambios isotópicos actuales indican variaciones en los regímenes hidrodinámicos como resultado de la explotación y recarga artificial de fluidos al yacimiento.

Los procesos más importantes que ocurren en el campo son ebullición local y en el yacimiento, así como invasión de agua de menor temperatura en la zona productora. La ilustración 13 presenta las áreas del campo donde se identificaron los procesos de ebullición, al igual que las afectadas por entradas de agua de menor temperatura.

La dinámica de los fluidos en cada una de las zonas parece ser diferente. Los procesos pueden explicarse a partir de los siguientes modelos:

- En la zona sur, los fluidos inyectados interfieren las zonas productoras de pozos productores localizados al oeste (AZ-2, AZ-33, AZ-46 y AZ-16). Los datos termodinámicos y de producción de los pozos de vapor someros AZ-6 y AZ-17 no indican efectos ocasionados por el arribo de los fluidos de baja temperatura. Sin embargo, el incremento en el contenido de N_2 , Ar y He en el fluido de descarga demuestra la ocurrencia de procesos de ebullición del fluido de inyección que ocasiona separaciones de fases.

La fase gaseosa con mayor velocidad de difusión se distribuye a través del sistema de fallas y fracturas, alcanzando las zonas productoras localizadas en los estratos someros del campo. La posibilidad de arribo de líquido a las zonas productoras de estos pozos dependerá de las condiciones termodinámicas prevalecientes en la trayectoria de los fluidos —las cuales rigen su estado— y de las cargas hidráulicas de los fluidos involucrados para que ocurran procesos de filtración a través de la estructura poco permeable.

- En la zona norte, la distribución de los fluidos de inyección hacia los estratos productores de los pozos parece estar restringida. La conexión hidráulica lateral y vertical de los pozos inyectores con las regiones productoras de los pozos cercanos está limitada por la estructura geológica. El sistema de fracturas y fallas en esta área aparentemente no funciona como un conducto de interconexión.

El nivel estático del fluido en el estado natural presenta un gradiente en dirección noroeste hacia el pozo inyector AZ-52. Ello indica que el flujo del agua inyectada tendría que realizarse a contracorriente con el flujo natural del fluido geotérmico. La inyección se realiza a diferentes profundidades (AZ-15 a 1,850 msnm y AZ-52 a 850 msnm, aproximadamente). Parece poco probable que el fluido inyectado por el pozo AZ-15 alcance alguna zona productora de los pozos vecinos. Sin embargo, para esta área se postula un proceso similar al que se discutió para la región sur, en el cual el agua inyectada se separa a profundidad y la parte gaseosa alcanza al pozo AZ-41, que resulta ser el único productor de vapor de esta área.

En el norte, la extracción de fluido geotérmico se realiza principalmente de la andesita microlítica y de la porfídica. A pesar de que el fluido de inyección del pozo AZ-52 se realiza en la andesita microlítica, no se han podido demostrar plenamente cambios químicos e isotópicos apreciables en el fluido del pozo AZ-4 que puedan atribuirse al fluido de inyección. Por otro lado, los cambios hidráulicos ocasionados por la explotación del yacimiento geotérmico no han logrado que ocurra una recarga natural

del acuífero de aguas subterráneas; en su lugar, los procesos que gobiernan los fenómenos fisicoquímicos en tal zona han sido los de ebullición en el área de alimentación y en el yacimiento, observándose una disminución de la fracción de líquido en relación con la fracción obtenida en el pasado. En el pasado se ha notado la entrada de agua de menor temperatura en el pozo AZ-9, por esto se incluye en la zona afectada por dicho proceso (ver ilustración 13).

Conclusiones

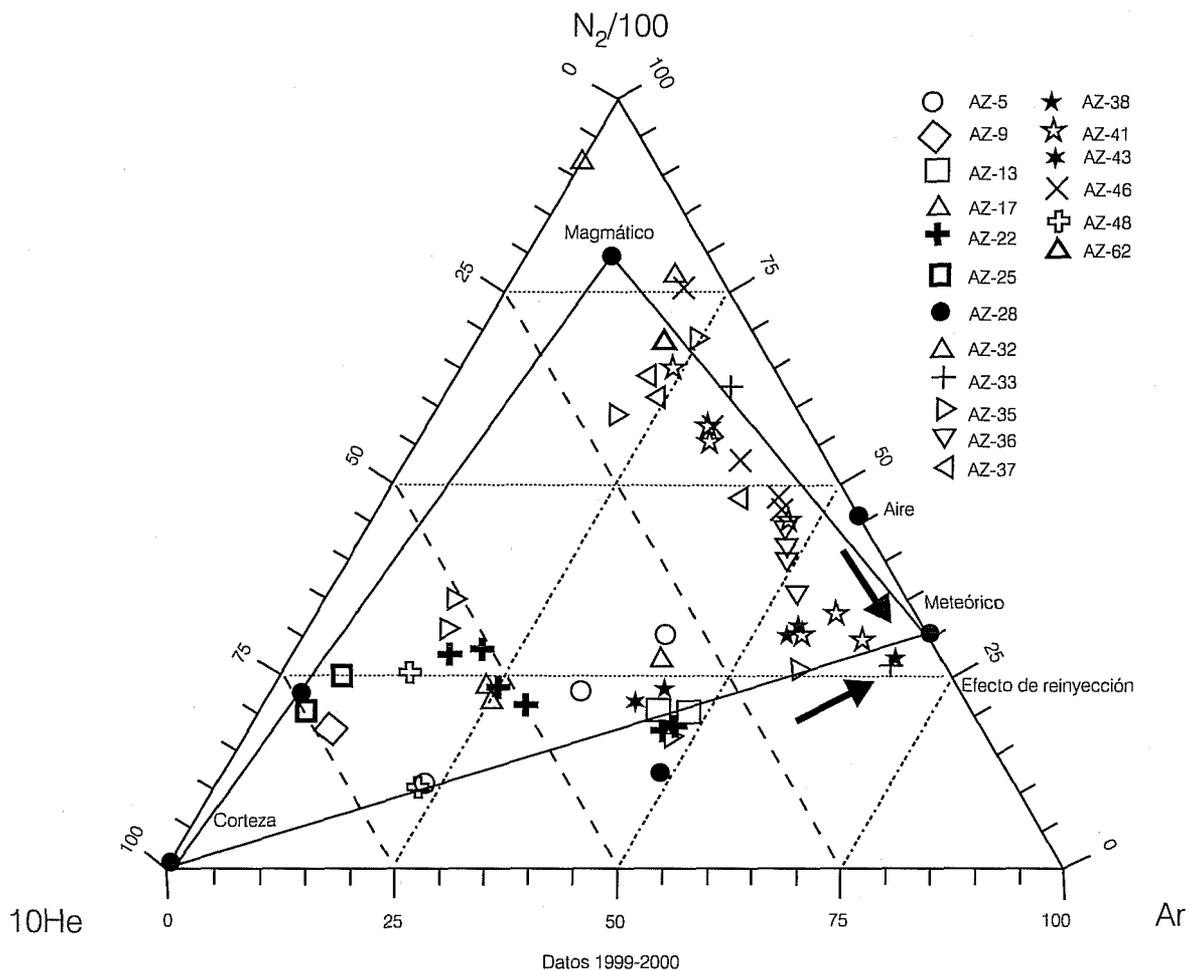
Con el objeto de inferir la ocurrencia de fenómenos de yacimiento como consecuencia de la explotación, se obtuvieron patrones de comportamiento de las estimaciones de temperatura en el tiempo para los pozos de Los Azufres. Los resultados indican actualmente procesos tales como entrada de agua fría en los pozos

AZ-2, AZ-4, AZ-33 y AZ-46; se identificaron fenómenos de condensación en la tubería en el pozo AZ-5; ebullición en el yacimiento en los pozos AZ-16AD, AZ-22, AZ-26, AZ-28, AZ-43, AZ-48, AZ-56 y AZ-62, y ebullición localizada cerca de los pozos AZ-13, AZ-18, AZ-32 y AZ-36. El fenómeno más importante inferido es el de ebullición, el cual se debe a la baja de presión en el yacimiento como consecuencia de su explotación.

La composición isotópica de la descarga total de pozos productores del campo geotérmico de Los Azufres muestra la respuesta del yacimiento a la explotación y a la reinyección. La interferencia de fluidos de reinyección modificó la tendencia isotópica, principalmente en la zona sur del campo. En esta área se observan los valores máximos de N_2 , $\delta^{18}O$, δD , Cl, así como los valores mínimos tanto de entalpía como de temperatura de yacimiento.

Se establece que el proceso de separación de vapor y condensación parcial en el yacimiento aún ocurre a

Ilustración 17. Composición relativa N_2 -He-Ar (modificado de Giggenbach, 1992) en la fase vapor de pozos, según datos de 1999-2000.



pesar de la explotación, aunque en la zona sur se observa un fenómeno de mezcla por efecto de los fluidos inyectoros. Este comportamiento se observa en los pozos AZ-2, AZ-33 y AZ-46, principalmente. Actualmente no se nota interferencia de fluidos de reinyección en la parte norte del campo a pesar de que pozos como el AZ-4 y el AZ-9 han recibido agua de menor temperatura y en el pozo AZ-41 se ha incrementado la concentración de nitrógeno en la descarga total. Es posible que la reinyección en la zona norte se efectúe en una región de descarga natural del sistema.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal de la Residencia Los Azufres de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por proporcionar datos y permitir la publicación de este trabajo. El material expuesto aquí es parte de los resultados del proyecto *Estudio isotópico de fluidos de pozos productores y de reinyección del campo geotérmico de Los Azufres Michoacán*, realizado conjuntamente por personal de la Residencia Los Azufres y del IIE. También se agradece a los revisores anónimos sus útiles comentarios.

Nomenclatura

- α coeficiente de partición de las especies isotópicas (adimensional).
 δ relación de composición isotópica en relación con un estándar internacional en $(\%_{\text{oo}})_{\text{smow}}$.
PC presión de cabezal (bar).
PS presión de separación primaria (bar).
PS' presión de separación secundaria (bar).
T temperatura ($^{\circ}\text{C}$).
H entalpía (kJ/kg).
y fracción de vapor en la separación primaria (adimensional).
y' fracción de vapor en la separación secundaria (adimensional).
TS temperatura de la separación primaria ($^{\circ}\text{C}$).
TS' temperatura de la separación secundaria ($^{\circ}\text{C}$).

Subíndices

- DT descarga total.
i especie isotópica (oxígeno-18 o deuterio).
VS vapor separado.
LS líquido separado.

Supraíndices

- TSMV temperatura de separación de la muestra de vapor.
TSMIL temperatura de separación de la muestra líquida.

Referencias

- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, M. Tello y E. Tello, "Comportamiento isotópico de fluidos de pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México", *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, vol. 13, núm. 1, 1997, pp. 31-42.
- Barragán, R.M., E. Portugal, V.M. Arellano y J. Martínez, *Estudio isotópico de fluidos de pozos productores y de reinyección del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán*, informe IIE/11/11172/03/F para la Comisión Federal de Electricidad, 1999, 155 pp.
- Barragán, R.M., E. Portugal y A. Aragón, *Estudio isotópico de fluidos de pozos productores y de reinyección del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán*, informe IIE/11/11872/02/F para la Comisión Federal de Electricidad, 2000, 144 pp.
- Barragán, R.M., E. Portugal, V.M. Arellano, A. Aragón y F. Sandoval, "Isotopic Changes of Fluids from the Los Azufres (Michoacán) Geothermal Field, Mexico", IAEA Coordination Meeting on Isotopic and Geochemical Techniques in Geothermal Exploration and Reservoir Management, Cebu, Filipinas, 2001a, 6 pp.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval y V.M. Barrera, "Gas Equilibria for the Los Azufres (Michoacán) Geothermal Reservoir, México", *Proceedings 22nd PNO-EDC Geothermal Conference*, Manila, Filipinas, 2001b, pp. 81-87.
- Barragán, R.M., E. Portugal, V.M. Arellano y F. Sandoval, "²²²Radon and Helium Behavior in the Los Azufres Geothermal Field, Mexico", *IAEA Advisory Group Meeting on the State of the Art and Development Needs for Noble Gas Isotope Applications in Geothermal Reservoir Exploration and Monitoring*, aceptado para publicación, Viena 2001c, 13 pp.
- Cathelineau, M., R. Oliver y D. Nieva, "Geochemistry of Volcanic Series of the Los Azufres, Geothermal Field", *Geofísica Internacional*, vol. 26, 1987, pp. 273-290.
- D'Amore, F., *Time Evolution of Chemical and Physical Parameters of the Reservoir Fluid in Ahuachapán Geothermal Field (El Salvador)*, informe para el Organismo de Energía Atómica, 1998, 210 pp.
- Dobson, P.F. y G.A. Mahood, "Volcanic Stratigraphy of the Los Azufres Geothermal Area, Mexico", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 245, 1985, pp. 273-287.
- Epstein, S. y T. Mayeda, "Variation of ¹⁸O Content of Waters from Natural Sources", *Geochimica Cosmochimica Acta*, vol. 4, 1953, pp. 213-224.
- Fournier, R.O. y R.W. Potter II, "A Revised and Expanded Silica (Quartz) Geothermometer", *Geothermal Resources Council Bulletin*, noviembre de 1982, pp. 3-12.

Recibido: 28/04/2001
Aprobado: 29/05/2002

- Friedman, I., "Deuterium Content of Natural Waters and other Substances", *Geochimica Cosmochimica Acta*, vol. 4, 1953, 89 pp.
- Garduño, M.V.H., *Estudio geológico regional para conocer las características de las rocas del basamento relativo del campo geotérmico de Los Azufres*, informe 20/87, CFE (inédito), 1987.
- Gat, R.J., "The Isotopes of Hydrogen and Oxygen in Precipitation", *Handbook of Environmental Isotopes Geochemistry*, Fritz, P. y Ch. Fontes (editores), VI Elsevier Scientific Publishing Company, 1980, pp. 545.
- Giggenbach, W.F., "Isotopic Shifts in Water From Geothermal and Volcanic Systems Along Convergent Plate Boundaries and their Origin", *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 113, 1992, pp. 495-510.
- Giggenbach, W. y J.L. Quijano, *Estudio isotópico de las aguas del campo geotérmico de Los Azufres*, informe interno, Comisión Federal de Electricidad, México, 1981.
- Goyal, K.P., S. Halfman, A.H. Truesdell y J. Howard, *Production Characteristics of Some Wells at the Cerro Prieto Geothermal Field*, informe Lawrence Berkeley National Laboratory, Earth Sciences Division, LBL-15500, Berkeley, 1980.
- Grant, M.A., G. Donaldson y P.F. Bixley, *Geothermal Reservoir Engineering*, Academic Press, Nueva York, 1982, 331 pp.
- Gutiérrez, N.C.L.A. y F. Aumento, "The Los Azufres Michoacán, México, Geothermal Field", *Journal Hydrology*, vol. 56, 1982, pp. 137-162.
- Gutiérrez, P.H. y M.C. Suárez, "Los Azufres Geothermal Field: An Updated Description from a Production/Injection Point of View", *Geothermal Resources Council Bulletin*, septiembre/octubre de 1992, pp. 301-310.
- Iglesias, E.R. y V.M. Arellano, *Apoyo en ingeniería de yacimientos para el campo geotérmico de Los Azufres. Fase 1: integración de un modelo básico del yacimiento*, informe IIE/11/1864/I 04F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, 1985.
- Iglesias, E. y V.M. Arellano, "Sistemas hidrotermales VAP-LIQ y su aplicación al yacimiento geotérmico de Los Azufres, México", *Memorias del Simposio Internacional sobre Desarrollo y Explotación de Recursos Geotérmicos*, Cuernavaca, México, octubre de 1987, pp. 251-261.
- Nieva, D., J. Quijano, A. Garfias, R.M. Barragán y F. Laredo, "Heterogeneity of the Liquid Phase and Vapor Separation in Los Azufres (Mexico) Geothermal Reservoir", *Proceedings 9th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, 1983, pp. 253-260.
- Nieva, D., M. Verma, E. Santoyo, R.M. Barragán, E. Portugal, J. Ortiz y L. Quijano, "Chemical and Isotopic Evidence of Steam Upflow and Partial Condensation in Los Azufres Reservoir", *Proceedings 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, 1987, pp. 253-259.
- Nieva, D. y R. Nieva, "Developments in Geothermal Energy in Mexico-Part Twelve. A Cationic Geothermometer for Prospecting of Geothermal Resources", *Heat Recovery Systems & CHP*, vol. 7, 1987, pp. 243-258.
- Portugal, E., M.P. Verma, R.M. Barragán y A. Mañón, "Geoquímica isotópica de ^{13}C , D y ^{18}O de fluidos del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla (México)", *Geofísica Internacional*, vol. 33, núm. 4, 1994, pp. 607-618.
- Quijano León, J.L. y L.C.A. Gutiérrez Negrín, "Geothermal Production and Development Plans in Mexico", *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japón, 2000, pp. 355-361.
- Rivera, J., *Course on Injection Technology*, WGC'95 Pre-Congress Course, Pisa, 1995, 176 pp.
- Suárez, M.C., J. Moreno, M. Tello y R. Estrada, "Respuesta inicial del sistema hidrotermal de Tejamaniles a la explotación", *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, vol. 6, núm. 3, 1990, pp. 265-296.
- Suárez, M.C., L. Ortega y L. del Río, "Fifteen Years of Development of Los Azufres Geothermal Field", *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, vol. 3, Florencia 1995, pp. 1791-1796.
- Torres Rodríguez, M.A. y M. Flores Armenta, "Pressure and Enthalpy Evolution in Wells of the Los Azufres Geothermal Field", *Geothermal Resources Council Transactions*, vol. 22, 1998, pp. 339-358.
- Torres Rodríguez, M.A. y M. Flores Armenta, "Reservoir Behavior of the Los Azufres Geothermal Field, After 16 Years of Exploitation", *Proceedings World Geothermal Congress*, Kyushu-Tohoku, Japón, 2000, pp. 2269-2275.
- Truesdell, A.H., M. Natheson y R.O. Rye, "The Effects of Subsurface Boiling and Dilution on the Isotopic Compositions of Yellowstone Thermal Waters", *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, núm. 26, 1977, pp. 3694-3704.
- Truesdell, A.H., M.J. Lippmann, J.L. Quijano y F. D'Amore, "Chemical and Physical Indicators of Reservoir Processes in Exploited High-Temperature Liquid-Dominated Geothermal Fields", *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, vol. 3, Florencia, 1995, pp. 1933-1938.
- Venegas, S., J.J. Herrera y F. Maciel, "Algunas características de la faja volcánica mexicana y de sus recursos geotérmicos", en *Geofísica Internacional*, volumen especial sobre el cinturón volcánico mexicano - parte 1, Verma, S.P. (editor), vol. 24, 1985, pp. 47-81.

Abstract

Barragán Reyes, R.M., E. Portugal Marín, V.M. Arellano Gómez, A. Aragón Aguilar & F. Sandoval Medina, "Isotopic Evolution of Wells in the Geothermal Field of Los Azufres, Michoacán, Mexico", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. 17, no. 4, pages 99-113, October-December, 2002.

Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) data from production and reinjection well fluids from the Los Azufres geothermal field were interpreted in order to define reservoir evolution and the occurrence of physical processes as a result of exploitation. The study included data of 30 wells, which were sampled in September, 2000. General results indicate that different phenomena seem to occur in both zones of the field. In the southern zone there are two different trends of behavior: a mixture of fluids evidenced by the δD versus $\delta^{18}\text{O}$ trend with a positive slope, where the isotopically enriched fluid is constituted by the reinjection fluid. The other trend, with a negative slope, was interpreted as the result of reservoir vapor separation at a temperature above 220°C , since for temperatures above 220°C deuterium behaves as a volatile component. No well-defined δD vs $\delta^{18}\text{O}$ trend was found for the northern zone, but some points seem to fit the same negative slope trend found in the southern zone. The study of reservoir temperatures estimated by different approaches for particular wells through time, as well as temperature results obtained with a heat and flow well simulator, suggest that reservoir boiling occurs in localized areas in both zones of the field. This process is probably due to exploitation.

Keywords: Los Azufres geothermal field, isotopic geochemistry, geothermal fluids, field evolution.

Dirección institucional de los autores:

Rosa María Barragán Reyes
Enrique Portugal Marín
Víctor Manuel Arellano Gómez
Alfonso Aragón Aguilar

Instituto de Investigaciones Eléctricas
Reforma 113, colonia Palmira,
62490 Temixco, Morelos, México.
Correo electrónico: rmb@iie.org.mx

Fernando Sandoval Medina

Comisión Federal de Electricidad
Residencia Los Azufres
Campamento Agua Fría
Los Azufres, Michoacán, México.