

# Evolución termodinámica (1982-2002) de los fluidos del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México

Víctor Manuel Arellano

*Instituto de Investigaciones Eléctricas, México*

Marco Antonio Torres

*Comisión Federal de Electricidad, México*

Rosa María Barragán

*Instituto de Investigaciones Eléctricas, México*

Fabiola N. López

*Universidad de las Américas, México*

*En este trabajo se presenta un estudio sobre la evolución termodinámica de los fluidos del yacimiento de Los Azufres como respuesta a la extracción y reinyección de fluidos desde el inicio de su explotación en 1982 hasta el año 2002. Las condiciones termodinámicas de los fluidos del yacimiento se obtuvieron mediante el simulador de flujo de fluidos y calor en pozos WELFLO, a partir de datos de producción. Las condiciones termodinámicas iniciales de los fluidos de la zona norte de campo se encontraron en la región de líquido comprimido; la primera respuesta a la explotación consistió en una disminución de presión y un incremento en la entalpía. A largo plazo, estos cambios indican cambios muy pequeños en la presión y grandes incrementos en la entalpía. En la zona sur, las condiciones termodinámicas iniciales de los fluidos indicaron la existencia de líquido comprimido, dos fases líquido dominante, dos fases vapor dominante y vapor. La respuesta de la zona sur a la explotación consistió en una disminución de la presión y un aumento en la entalpía, mientras que a más largo plazo se han observado los siguientes patrones: disminución de presión y gasto, ebullición, enfriamiento, producción de vapor, y en los pozos afectados por el proceso de reinyección un aumento en la presión y en la tasa de producción.*

**Palabras clave:** campo geotérmico Los Azufres, condiciones termodinámicas de fluidos, datos químicos y de producción, ingeniería de yacimientos, explotación de yacimientos.

## Introducción

El campo geotérmico de Los Azufres se encuentra localizado aproximadamente a 90 km de la ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán, México (ilustración 1). El campo se encuentra en la sierra de los Azufres,

la cual alcanza elevaciones que exceden los 3,200 msnm. Las elevaciones de los cabezales de los pozos perforados varían aproximadamente entre 2,750 msnm y algo más de 3,000 msnm. Los valles vecinos se encuentran varios centenares de metros por debajo de la elevación promedio del campo. En el campo

se distinguen dos zonas bien definidas de descarga de fluidos geotérmicos: Maritaro en la parte norte del campo, y Tejamaniles, en el extremo sur. Las zonas de descarga mencionadas se encuentran separadas por varios kilómetros de terreno que esencialmente no contiene manifestaciones superficiales (ilustración 1). Actualmente, el campo cuenta con una capacidad instalada de 88 MWe (Torres y Flores, 2000; Quijano y Gutiérrez, 2000) y se encuentran en construcción cuatro unidades de 25 MWe cada una.

En este trabajo se presentan los resultados de estudiar la respuesta del yacimiento a las políticas de explotación (1980-2002) a partir del análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de veinte pozos del campo. Trece de los pozos corresponden a la zona sur (Az-2, Az-17, Az-18, Az-22, Az-25, Az-26, Az-33, Az-34, Az-35, Az-36, Az-37, Az-38 y Az-46) y siete pozos a la zona norte (Az-4, Az-5, Az-9, Az-13, Az-19, Az-28, y Az-43).

Los objetivos del análisis fueron los siguientes: a) identificar los principales procesos que han ocurrido y ocurren en el yacimiento de Los Azufres como consecuencia de la extracción de fluidos y calor y de la inyección de fluidos de desecho en el mismo, y b) relacionar dichos efectos con sus probables causas.

## Características geológicas

La geología del área de Los Azufres ha sido descrita por diversos autores, entre los que se encuentran De la Cruz *et al.* (1983), Dobson y Mahood (1985), Cathelineau *et al.* (1987), Ferrari *et al.* (1991) y Pradal y Robin (1994). A continuación se presenta un pequeño resumen de las principales unidades geológicas del campo geotérmico Los Azufres y sus características (ilustración 1).

Andesita Mil Cumbres. Esta unidad se considera como el basamento local y consiste de aproximadamente 3,000 m de una secuencia de rocas que varía de andesitas basálticas a dacitas (600 m de basaltos en la base, seguidos de 1,700 m de andesitas y de 700 m de dacitas en la parte superior). La edad de esta unidad varía de 18.1 millones de años, en la parte inferior, a 5.9 millones de años en la parte superior. Algunos afloramientos de esta unidad se pueden ver en las partes norte y sur del campo.

Andesita Zinapécuaro. Esta unidad consiste de lavas andesíticas y andesitas basálticas que afloran en la vecindad de Zinapécuaro, Michoacán, y cuya edad varía de 0.87 a 0.85 millones de años. No se muestran en la ilustración 1.

Riolita Agua Fría. El basamento está cubierto en su parte central por la unidad de riolita Agua Fría, la cual

está formada por domos de lava y flujos fragmentados de riolita con bandas de flujo y esférulas. Tres domos se encuentran dentro del campo y ocho fuera de él. La edad de estas unidades varía de 1.6 a 0.84 millones de años.

Dacita San Andrés. Esta unidad cubre las unidades anteriores y aflora en la parte este del campo. Se encuentra constituida por dacitas con bandas de flujo, fenocristales de plagioclasa e inclusiones afaníticas. La edad de esta unidad varía de 0.36 a 0.33 millones de años.

Riolita Yerbabuena. Esta unidad consiste de diez domos de riolitas ricas en sílice, riodacitas y material de caída libre localizados en la parte oeste del campo. La edad de esta unidad varía de 0.3 millones de años a 0.14 millones de años.

Basalto Ciudad Hidalgo. Esta unidad consta de 52 conos cineríticos, compuestos por derrames de basalto y material piroclástico localizados en las partes este y oeste del campo. Su edad es de aproximadamente 0.15 millones de años. Esta unidad no se muestra en la ilustración 1, ya que su afloramiento es lejano al área que cubre la ilustración.

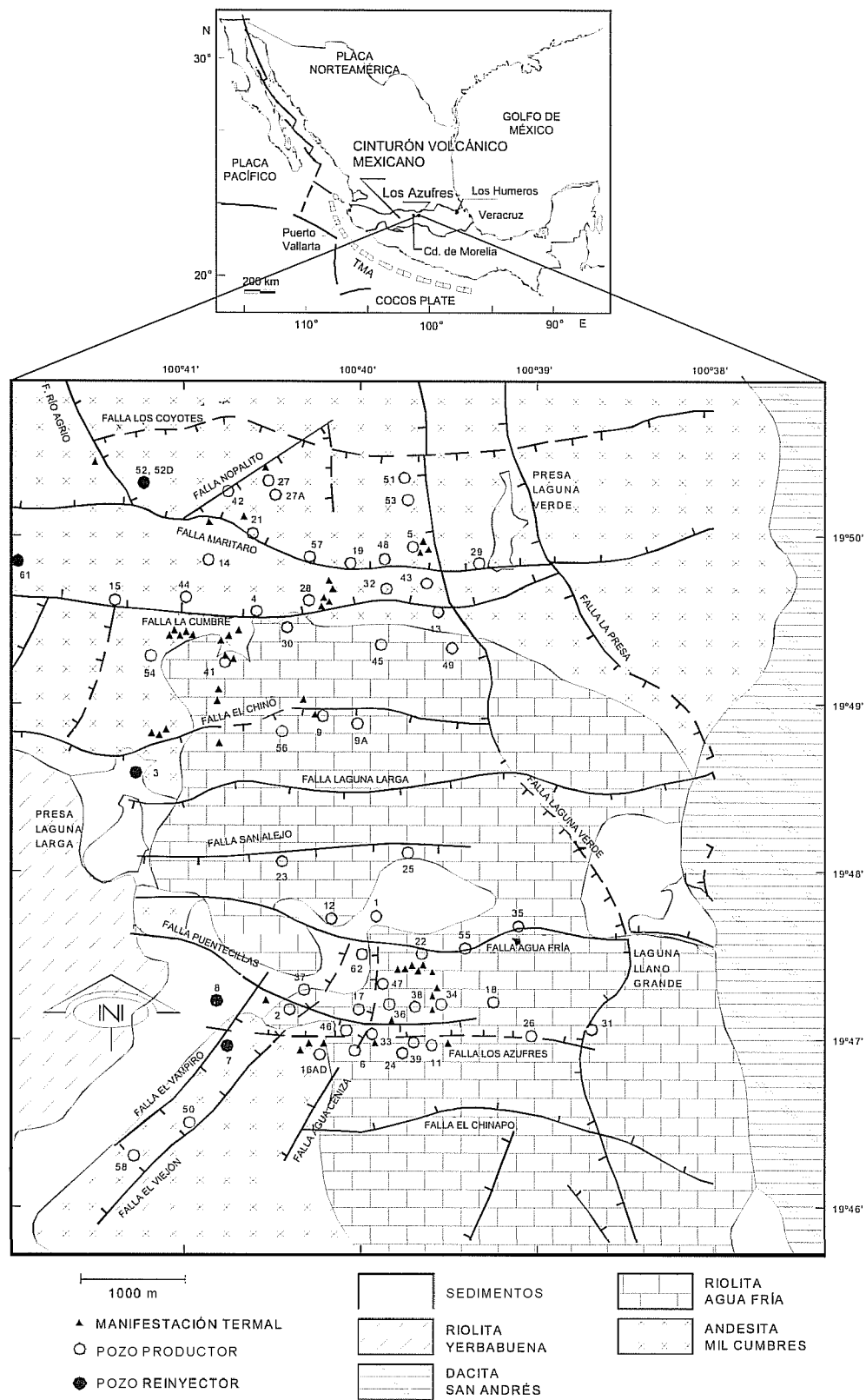
Sedimentos. Por último afloran las unidades de arenas pumicíticas, depósitos de alteración, suelos y aluviones.

En el yacimiento de Los Azufres se han identificado tres sistemas estructurales (De la Cruz *et al.*, 1983). El sistema más antiguo presenta un rumbo NE-SW y afecta principalmente a las rocas andesíticas basales. A este sistema pertenecen las fallas El Vampiro, El Viejón y Agua Ceniza, las cuales están ubicadas en la parte suroeste del campo (ilustración 1). El segundo sistema estructural presenta una orientación E-W y disloca a la dacita San Andrés y a la riolita Agua Fría. A este sistema pertenecen las fallas Los Coyotes, Maritaro, La Cumbre, El Chino, Laguna Larga, San Alejo, Agua Fría, Puenteillas, Los Azufres y El Chinapo. El sistema estructural más reciente tiene una orientación NNW-SSE y pertenecen a él las fallas Laguna Verde, La Presa y Río Agrio.

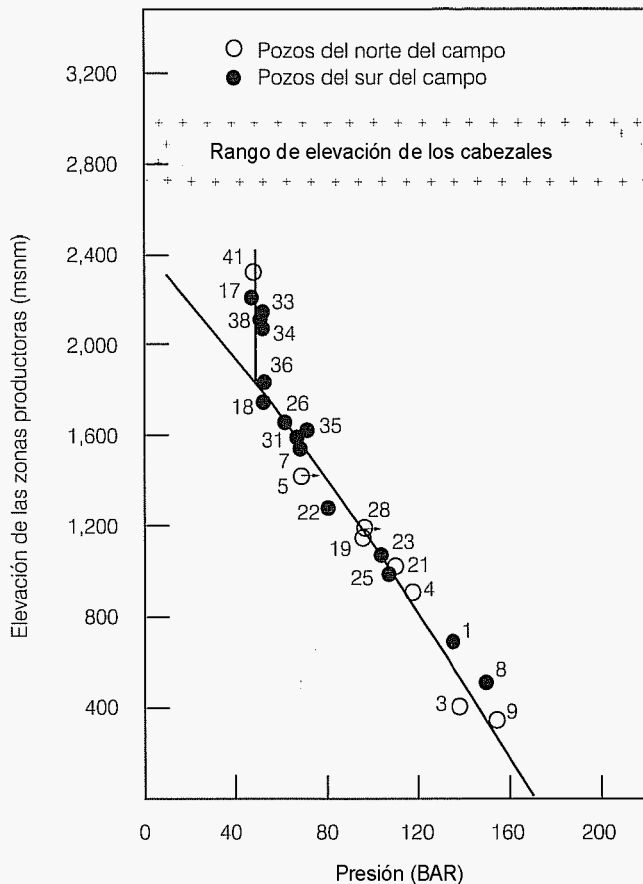
## Estado inicial del yacimiento

A partir del análisis de información geológica, geoquímica, geofísica, de perforación y de ingeniería de yacimientos de 25 pozos del campo (Iglesias *et al.*, 1985) se desarrolló un modelo vertical unidimensional del estado inicial del yacimiento. La ilustración 2 muestra el perfil vertical de las presiones *versus* las respectivas elevaciones. La línea llena representa el perfil de presión correspondiente a una columna de agua en ebullición (modelo PPEP: perfil de presión de ebullición *versus* profundidad, Grant *et al.*, 1982). Como puede observarse,

Ilustración 1. Localización del campo geotérmico de Los Azufres, geología de la zona y ubicación de los pozos.



**Ilustración 2. Perfil unidimensional de presión no perturbada (Iglesias et al., 1985).**



el ajuste del modelo PPEP es bueno para un rango de elevaciones que va de 350 a 1,800 msnm. Arriba de esta elevación, aproximadamente a 1,830 msnm, se observa un grupo de pozos (Az-17, Az-33, Az-34, Az-36, Az-38 y Az-41), cuyo comportamiento se aparta del modelo PPEP. El PPEP es un modelo estático, generalmente considerado como una buena aproximación al estado no perturbado del yacimiento. Este modelo se torna inapropiado para bajas saturaciones de líquido. Esto se debe a que el PPEP no puede ajustar las características intrínsecamente dinámicas del flujo bifásico a bajas saturaciones de líquido. En efecto, los pozos que se apartan del comportamiento PPEP presentan bajas saturaciones de líquido y conforman un perfil subvertical característico de yacimientos predominado por vapor.

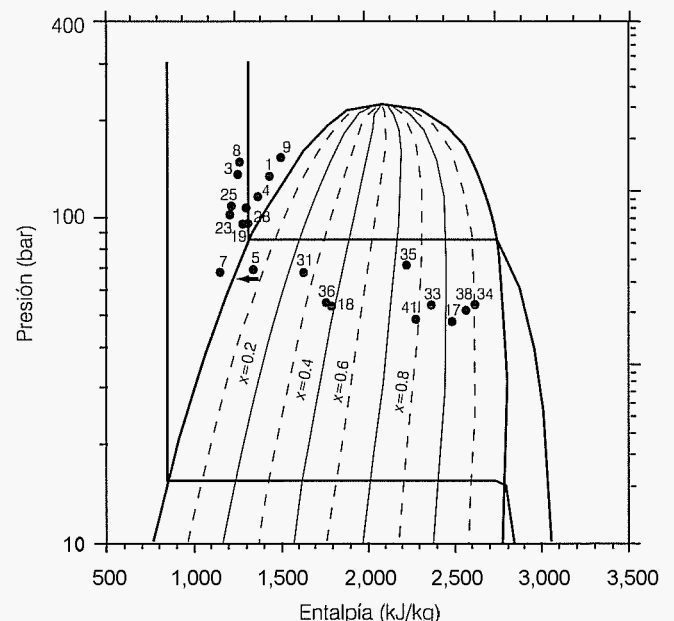
Este modelo muestra que en el yacimiento existe un acuífero profundo (por debajo de los 1,280 msnm) y caliente (aproximadamente a 303 °C). El líquido comprimido profundo asciende hasta que, aproximadamente a 1,280 msnm, comienza a ebullición. La región de fluido bifásico predominada por líquido se extiende

de 1,280 a 1,830 msnm, en donde el vapor se convierte en la fase que controla la presión. La región de fluido bifásico predominada por vapor se extiende hacia arriba hasta aproximadamente 2,400 msnm. En la ilustración 3 se muestra la distribución semilogarítmica presión-entalpía que sirve de base para estudiar la evolución termodinámica del yacimiento.

### El yacimiento en producción

En 1982 se inició la explotación comercial del campo Los Azufres con la entrada en operación de cinco unidades a contrapresión de 5 MWe cada una. En 1987 entró en operación una nueva unidad de 5 MWe, con lo que se alcanzó una capacidad instalada de 30 MWe. En el año de 1989 entró en operación una unidad de condensación de 50 MWe, con lo que se logró una capacidad instalada de 80 MWe. En 1991 entraron en operación dos unidades a contrapresión de 5 MWe cada una y en 1994 entraron en operación una unidad de 5 MWe y dos unidades de ciclo binario, con lo que se alcanzó la capacidad instalada de 98 MWe. En mayo de 1996 se retiraron de operación dos unidades de 5 MWe cada una, por lo que actualmente se tiene una capacidad de generación de 88 MWe (Torres y Flores, 2000), de los cuales 25 MWe se encuentran instalados en la zona norte y 63 MWe en la zona sur. Actualmente, cuatro unidades, de 25 MWe cada una, entraron en operación en el transcurso de 2003.

**Ilustración 3. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas no perturbadas de los pozos.**



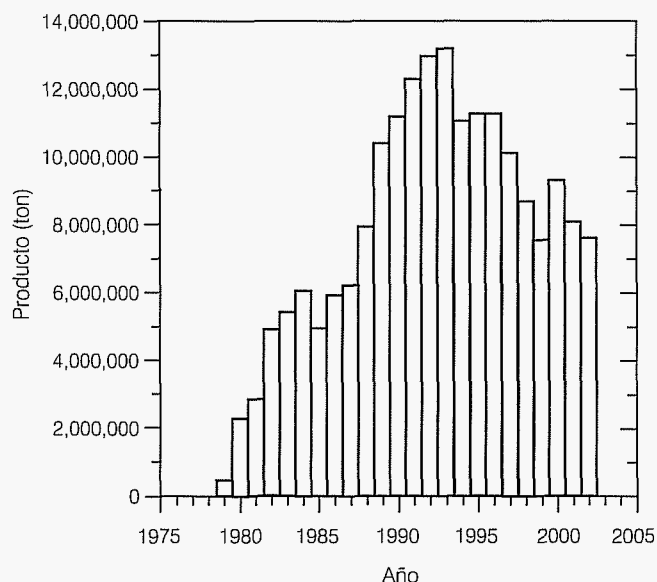
## Producción e inyección de fluidos

La producción e inyección de fluidos se ha modificado con el tiempo, dependiendo de la entrada y salida de operación de las unidades de generación. En las ilustraciones 4 y 5 se muestran las historias de producción e inyección de fluidos. La máxima extracción de fluidos (más de 13 Mt/año) se tuvo en 1993, cuando el campo tenía una capacidad instalada de 90 MWe. La relación entre el fluido inyectado al yacimiento y el fluido extraído ha tenido grandes variaciones, con un promedio anual, en los últimos diez años, del orden del 50%. Los fluidos se inyectan a una temperatura que varía entre 40 y 50 °C a la presión atmosférica. En la zona norte del campo se inyectan fluidos en los pozos Az-3, Az-15, Az-52 y Az-61. En la zona sur, los pozos de inyección son el Az-7 y el Az-8.

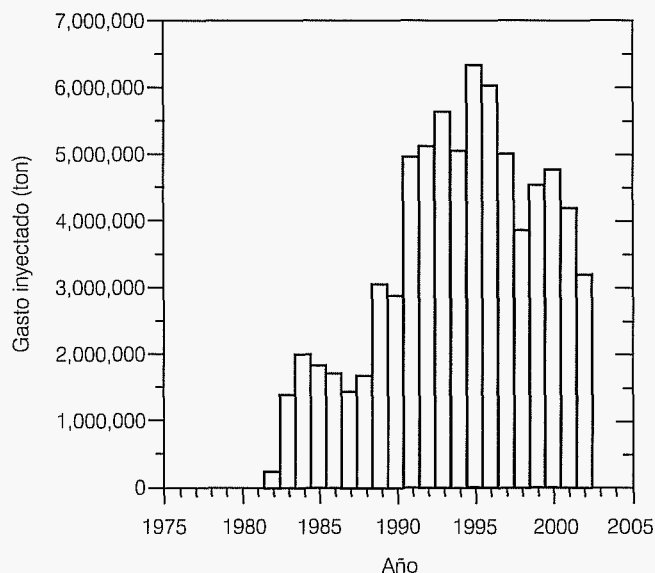
## Metodología

Con el fin de identificar los principales procesos que han ocurrido y que ocurren en el yacimiento de Los Azufres, como consecuencia de la extracción de fluidos y calor, así como de la inyección de fluidos de desecho en el mismo, se empleó la siguiente metodología propuesta por Arellano et al. (2003): se efectuó el análisis individual de los datos químicos, isotópicos y de producción de veinte pozos; en particular, se estudió la evolución de:

**Ilustración 4. Historial de producción total de fluidos en el campo geotérmico de Los Azufres.**



**Ilustración 5. Historial de inyección en el campo geotérmico de Los Azufres.**



- Presión, entalpía y temperatura estimadas a fondo de pozo y el gasto.
- La entalpía de la descarga ( $H_{DES}$ ), comparada con la de las entalpías de líquido correspondientes a las temperaturas calculadas con un geotermómetro de cationes  $H_{CCG}$  (Nieva y Nieva, 1987), y con un geotermómetro de sílice ( $H_{SIL}$ , Fournier y Potter, 1982).
- Los cloruros en la descarga total y el agua separada.
- $\delta^{18}O$  y  $\delta D$ .

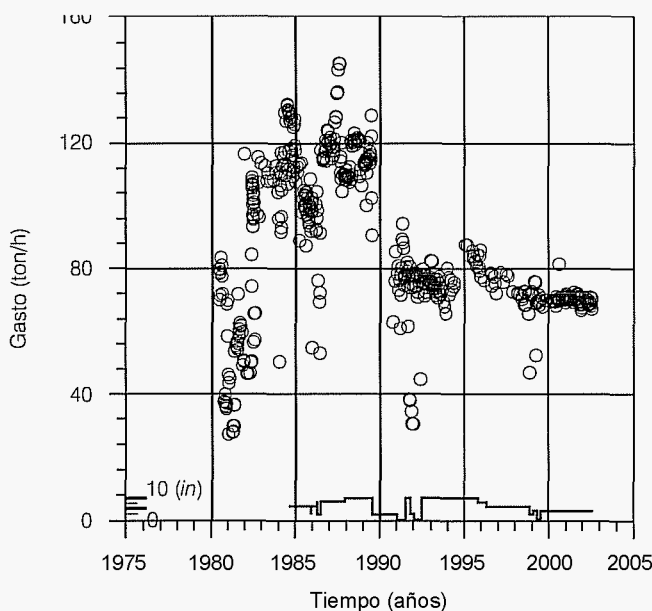
La presión, entalpía y temperatura a fondo de pozo se estimaron por medio del simulador de pozo *WELFLO* (Goyal et al., 1980). *WELFLO* es un simulador de pozos geotérmicos en diferencias finitas que considera el flujo multifásico, unidimensional y en estado estacionario; es útil en la simulación de pozos verticales de diámetro variable. Este modelo ha sido ampliamente validado contra datos de campo (Goyal et al., 1980). Los datos que se le alimentaron al *WELFLO* son la geometría (longitud, diámetros, etcétera), el flujo másico, la presión y la entalpía de cabezal.

## Resultados

Al aplicar la metodología antes citada fue posible identificar los principales procesos que han ocurrido en las inmediaciones de un determinado pozo y correlacionarlos con sus posibles causas. Como un ejemplo de la aplicación

de la citada metodología se presenta el caso del pozo Az-13, localizado en la parte norte del campo. Este pozo tiene una profundidad de 1,215 m, con una tubería ranurada de 194 m (1021-1215 m). Se cuenta con datos de producción de mayo de 1980 a junio de 2002. El gasto muestra un comportamiento irregular con una tendencia a disminuir a partir de 1987 (ilustración 6), la presión a fondo de pozo disminuye gradualmente (ilustración 7) y la entalpía se incrementa significativamente a partir de 1990 (ilustración 8). Las entalpías estimadas con los geotermómetros (ilustración 9) nos indican que, hasta el año 1989, existió un proceso de ebullición local en las inmediaciones del pozo. A partir de 1990 se observa un proceso de ebullición generalizado que, inclusive, lleva al pozo a producir vapor sobrecalentado (ilustración 10). Esto nos indica que actualmente el pozo no recibe una recarga de fluido importante. Sin embargo, es conveniente mencionar que en 1995 se observa un incremento en el gasto del pozo Az-13 y una disminución de la entalpía; estos hechos coinciden con el pico de inyección mas importante en el pozo Az-15 (ilustración 11). Al disminuir el pico de inyección el gasto disminuye y la entalpía se incrementa. También se observa que el  $\delta D$  sigue bastante bien el comportamiento del fluido inyectado en el pozo Az-15 (ilustración 12). Estos hechos parecen indicar que algo del fluido inyectado en el pozo Az-15 llega a la zona de alimentación del pozo Az-13. Sin embargo, el nivel de inyección no parece ser lo suficientemente alto como para producir cambios importantes en las condiciones termodinámicas del fluido que alimenta al pozo Az-13.

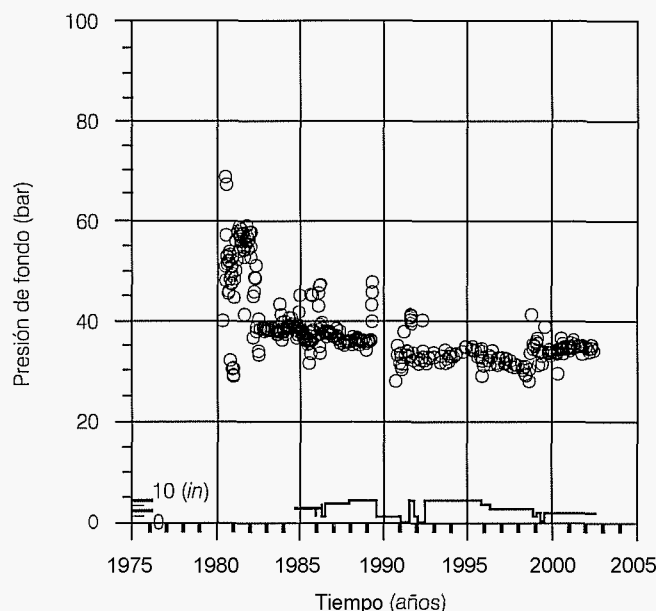
**Ilustración 6. Comportamiento del gasto del pozo Az-13. La línea sólida indica el diámetro del orificio de producción.**



## Zona norte del campo

En la ilustración 3 puede verse que en el estado inicial los pozos de la zona norte se encuentran, principalmente, en la región de líquido comprimido (Az-4, Az-9, Az-19,

**Ilustración 7. Comportamiento de la presión en el fondo del pozo Az-13 calculada con base en los datos de producción. La línea sólida indica el diámetro del orificio de producción.**



**Ilustración 8. Comportamiento de la entalpía en el fondo del pozo Az-13 calculada con base en los datos de producción. La línea sólida indica el diámetro del orificio de producción.**

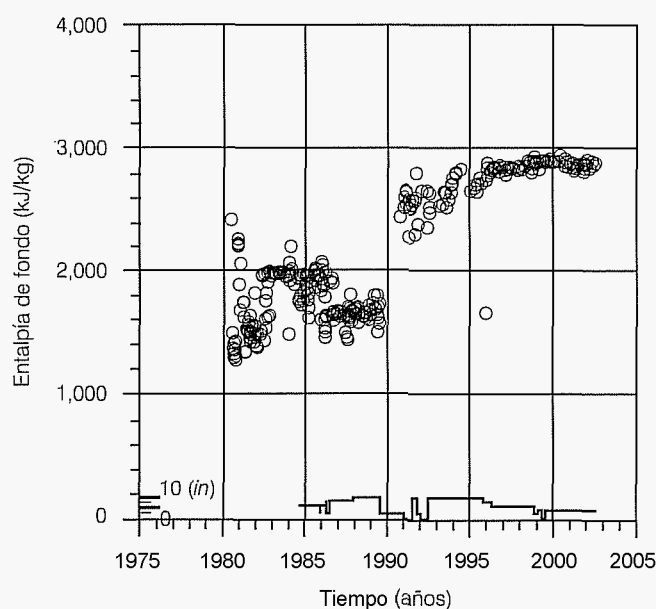


Ilustración 9. Entalpía de la descarga total y de las entalpías correspondientes a los geotermómetros de composición catiónica y de sílice del pozo Az-13.

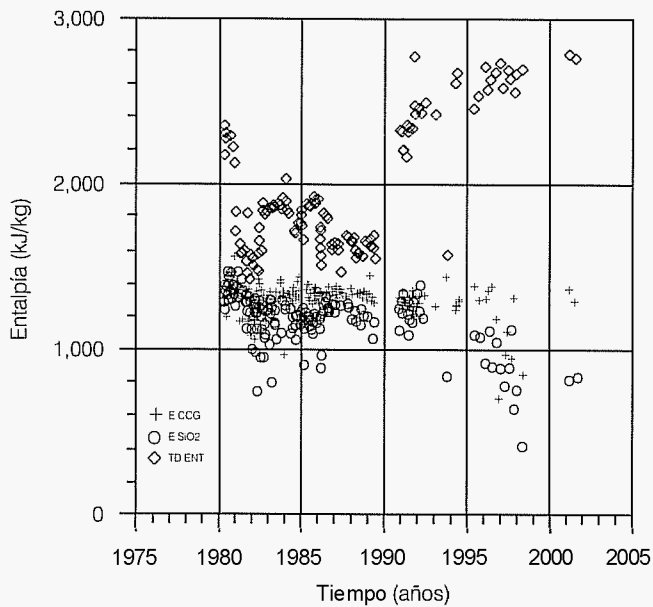
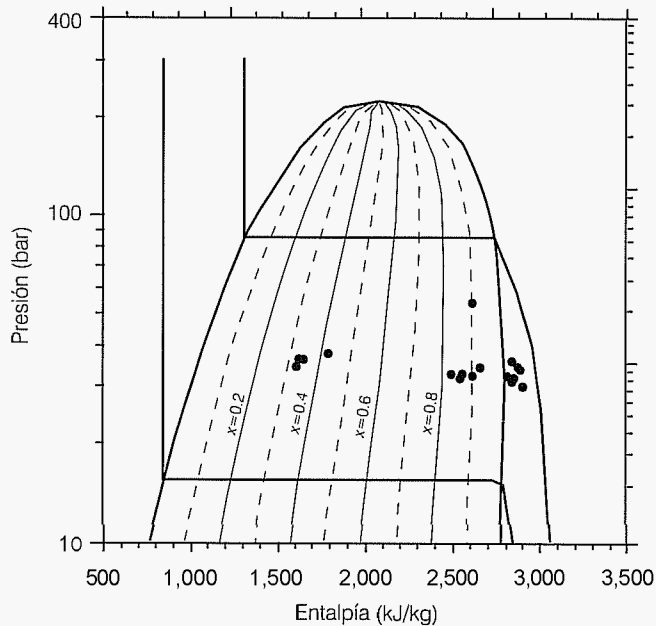


Ilustración 10. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas en el fondo del pozo Az-13. Los puntos indican los valores promedio anuales.



Az-21 Az-28, Az-5). En la ilustración 13 se muestra el comportamiento del promedio anual de la presión y la entalpía de los pozos productores estudiados en la zona norte del campo. Al comparar las ilustraciones 3 y

Ilustración 11. Comportamiento del gasto inyectado en el pozo Az-15.

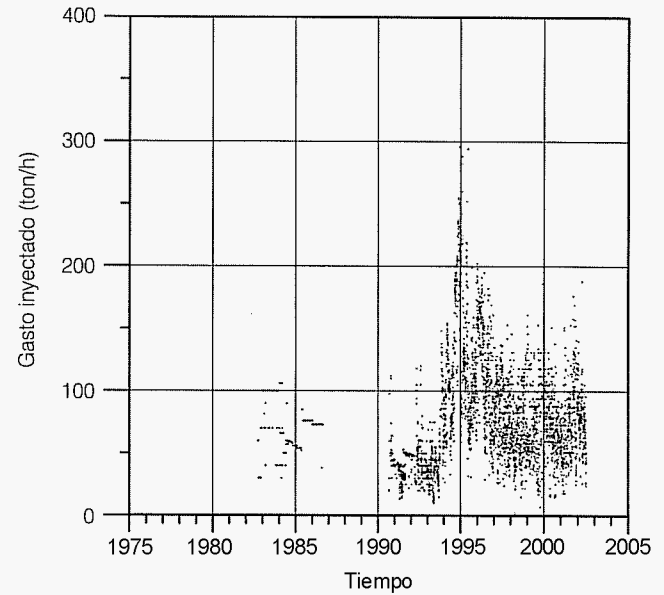
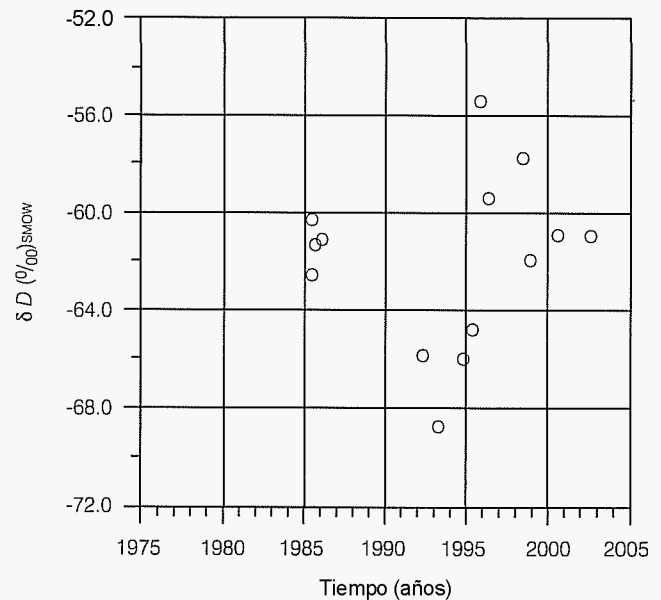


Ilustración 12. Comportamiento del deuterio en la descarga total del pozo Az-13.



13 puede verse que los pozos estudiados respondieron inicialmente a la extracción de fluidos con la disminución de la presión y un incremento en la entalpía. En la respuesta de mayor plazo puede verse que los pozos Az-4 y Az-9 no muestran grandes cambios en su entalpía; el primero debido a que cuenta con dos secciones de

tubería de producción, las cuales aportan fluidos de acuíferos diferentes; el más superficial suministra fluidos bastante fríos que impiden el incremento en su entalpía. El pozo Az-9 se encuentra localizado en la parte central del campo, en donde existe una baja densidad de pozos, por lo que muestra un comportamiento estable sin grandes procesos de ebullición. Por otra parte, los pozos Az-5, Az-13, Az-28 y Az-43 presentan cambios muy pequeños en la presión, pero grandes incrementos en la entalpía. El análisis de los datos químicos y de producción de estos pozos indica que algo del fluido inyectado en el pozo Az-15 ha llegado a la zona de alimentación de los pozos Az-13, Az-28 y Az-43, y que el fluido inyectado en el pozo Az-52 ha llegado a las zonas productoras de los pozos Az-5 y Az-43. Sin embargo, el nivel de inyección no parece ser lo suficientemente alto como para producir cambios importantes en las condiciones termodinámicas del fluido que alimenta los citados pozos.

### Zona sur del campo

En el estado inicial (ilustración 3), los pozos de la zona sur se encuentran tanto en la zona de líquido comprimido (Az-1, Az-7, Az-8, Az-23 y Az-25), como en las zonas de dos fases líquido dominante (Az-18, Az-31 y Az-36) y dos fases vapor dominante (Az-17, Az-33, Az-34, Az-35 y Az-38). La respuesta inicial de la mayor parte de los pozos

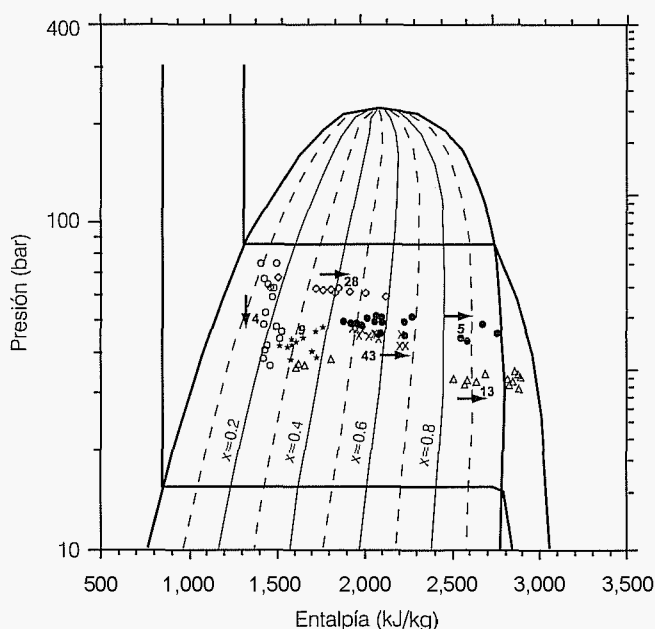
de esta zona del campo consiste en una disminución de la presión e incremento de entalpía. La respuesta a la explotación de largo plazo es mucho más compleja que la de la zona norte, ya que se observan cambios como disminución de presión y gasto, ebullición, enfriamiento, producción de vapor y, en algunos casos, se observan incrementos en la presión y en las tasas de producción.

A diferencia de la zona norte, en donde los procesos de inyección son apenas perceptibles, en la zona sur estos procesos son los que rigen el comportamiento de muchos de los pozos. De los pozos estudiados, los que presentan un importante efecto son: Az-2, Az-33, Az-34, Az-37 y Az-46. En la ilustración 14 se muestra el comportamiento de los pozos Az-2, Az-34 y Az-37. Como puede verse, estos pozos muestran algún incremento de presión y disminución de la entalpía.

Entre los pozos que reciben algo del fluido inyectado se encuentran Az-6, Az-17, Az-22, Az-36 y Az-38. En los últimos años, estos pozos muestran pequeños cambios en su presión y entalpía.

De los pozos estudiados en esta zona del campo, el Az-25 y el Az-26 no parecen recibir fluidos de inyección y desarrollan un proceso de ebullición local (ilustración 15). Estos pozos no logran mantener su gasto, la presión a fondo de pozo disminuye y la entalpía se incrementa. De mantenerse esta situación es muy probable que las condiciones a fondo de pozo evolucionen a dos fases vapor dominante y, tal vez, a vapor sobrecalentado.

**Ilustración 13.** Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas de fondo de pozos de la zona norte del campo.



**Ilustración 14.** Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas de fondo de los pozos Az-2, Az-34 y Az-37.

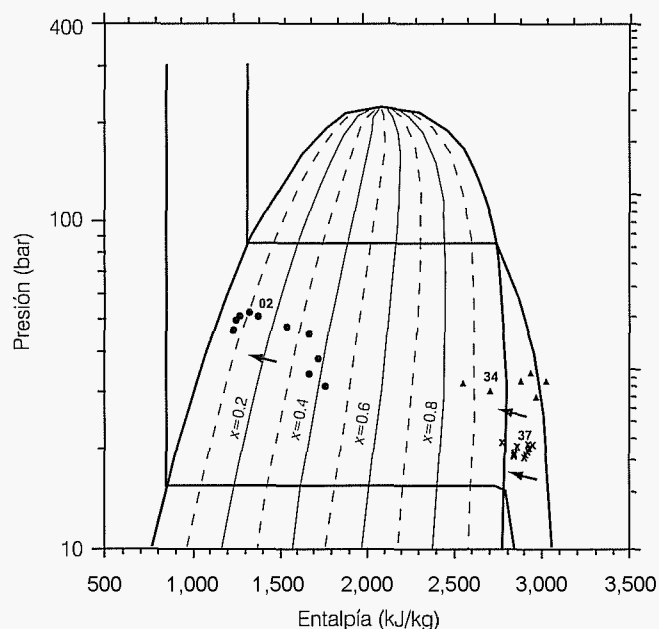
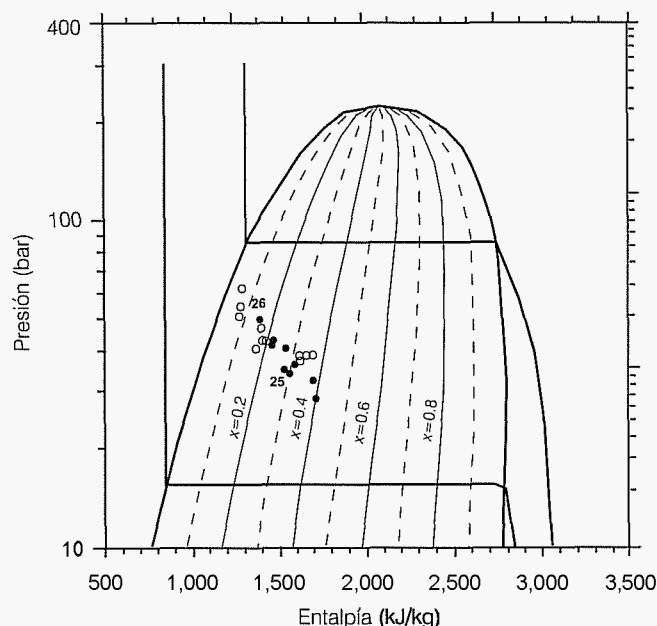




Ilustración 15. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas de fondo de los pozos Az-25 y Az-26.



Finalmente, en el pozo Az-18 se presenta un proceso de ebullición muy importante, similar al observado en algunos de los pozos de la zona norte del campo (por ejemplo Az-13). Los pozos Az-18, Az-25 y Az-26 no parecen estar conectados de manera importante a la red de fracturas que conducen los fluidos de inyección.

## Conclusiones

El análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de veinte pozos del campo permitió la identificación de los principales procesos que ocurren en el yacimiento, como resultado de las políticas de explotación.

La respuesta inicial de la zona norte del campo a la explotación consistió en la disminución de presión y el incremento de entalpía. La respuesta de largo plazo muestra que las condiciones termodinámicas del fluido que alimenta los principales pozos de esta zona han evolucionado de líquido comprimido a dos fases vapor dominante e, incluso, a vapor sobrecalentado.

El análisis de los datos químicos y de producción de los pozos de la zona norte indica que algo del fluido inyectado en el pozo Az-15 ha llegado a la zona de alimentación de los pozos Az-13, Az-28 y Az-43, y que el fluido inyectado en el pozo Az-52 ha llegado a las zonas productoras de los pozos Az-5 y Az-43. Sin embargo, el nivel de inyección no parece ser lo suficientemente

alto como para producir cambios importantes en las condiciones termodinámicas del fluido que alimenta los citados pozos.

La respuesta a la explotación de la zona sur es mucho más compleja que la de la zona norte, ya que se observan cambios como disminución de presión y gasto, ebullición, enfriamiento, producción de vapor y, en algunos casos, incrementos en la presión y en las tasas de producción.

A diferencia de la zona norte, en donde los procesos de inyección son apenas perceptibles, en la zona sur estos procesos son los que rigen el comportamiento de muchos de los pozos. De los pozos estudiados, los que presentan una importante interferencia de fluidos de inyección son: Az-2, Az-33, Az-34, Az-37 y Az-46.

Aun cuando la inyección de fluidos en la zona sur afecta una cantidad importante de pozos, existen pozos como el Az-18, Az-25 y Az-26 que se encuentran alejados de los pozos inyectoros y que no parecen estar conectados de manera importante a la red de fracturas que conducen los fluidos de inyección; por ello, desarrollan procesos de ebullición locales o generalizados.

## Agradecimientos

Los resultados que se presentan en este artículo forman parte del proyecto Estudio isotópico de fluidos de pozos productores y de reinyección del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, el cual forma parte de los trabajos que lleva a cabo la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad en los campos y zonas geotérmicas de México. Los autores desean expresar su agradecimiento a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos por apoyar la publicación de este trabajo. Asimismo, los autores agradecen la colaboración de dos revisores anónimos por los amables comentarios recibidos.

Recibido: 30/07/2003

Aprobado: 19/01/2004

## Referencias

- ARELLANO V.M., TORRES, M.A., BARRAGÁN, R.M., SANDOVAL, F. y LOZADA, R. Chemical, isotopic and production well data analysis for the Los Azufres (Mexico) geothermal field. *Geothermal Resources Council Transactions*. Vol. 27, núm. 12-15, octubre, 2003, pp. 275-279.
- CATHELIN, M., OLIVER, R. y NIEVA, D. Geochemistry of volcanic series of the Los Azufres geothermal field (Mexico). *Geofísica internacional*. Vol. 26, 1987, pp. 273-279.

- DE LA CRUZ, M., AGUILAR, S. y ORTEGA, D. Estudio geológico estructural a detalle del campo geotérmico Los Azufres, Mich. Informe CFE 9/83. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos 1983 (inédito).
- DOBSON, P.F. y MAHOOD, G.A. Volcanic stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico. *Journal of volcanology and geothermal research*. Vol. 25, 1985, pp. 273-287.
- FERRARI, L., GARDUNO, V.H., PASQUARÈ, G. y TIBALDI, A. Geology of Los Azufres Caldera, Mexico, and its relationship with regional tectonics. *Journal of volcanology and geothermal research*. Vol. 47, 1991, pp. 129-148.
- GOYAL, K.P., MILLER, C.W. y LIPPMANN, M.J. Effects of measured wellhead parameters and well scaling on the computed downhole conditions in Cerro Prieto wells. *Proc. 6<sup>th</sup> Workshop Geothermal Reservoir Engineering*. SGP-TR-50, Stanford, 1980, pp. 130-138.
- GRANT, M.A., DONALDSON, I. y BIXLEY, P. *Geothermal reservoir engineering*. New York: Academic Press, 1982.
- IGLESIAS, E.R., ARELLANO, V.M., GARFIAS, A., MIRANDA, C. y ARAGÓN, A. A one-dimensional vertical model of the Los Azufres, México, geothermal reservoir in its natural state. *Geothermal resources council, transactions*. Vol. 9, part II, 1985, pp. 331-336.
- NIEVA, D. y NIEVA, R. Developments in geothermal energy in Mexico-part twelve. A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources. *Heat recovery systems & CHP*. Vol. 7, núm. 3, 1987, pp. 243-258.
- PRADAL, E. y ROBIN, C. Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, Mexico. *Journal of volcanology and geothermal research*. Vol. 63, 1994, pp. 201-215.
- QUIJANO, J.L. y GUTIÉRREZ, L.C.A. Geothermal production and development plans in México. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku, Japón, 2000, pp. 355-361.
- TORRES, M.A. y FLORES, M. Reservoir behavior of the Los Azufres geothermal field, after 16 years of exploitation. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japón, 2000, pp. 2269-2275.

### Abstract

ARELLANO, V.M., TORRES, M.A., BARRAGÁN, R.M. & LÓPEZ, F.N. Thermodynamic evolution (1982-2002) of fluids at the Los Azufres geothermal field, Michoacan, Mexico. *Hydraulic engineering in Mexico* (in Spanish). Vol. XX, no. 1, January-March, 2005, pp. 77-87.

*This work presents a study on the thermodynamic evolution of the Los Azufres reservoir fluids as a response to exploitation since 1982 to the year 2002. Thermodynamic conditions for reservoir fluids were estimated using the WELFLO heat and flow well simulator, fed with production data as the input. The initial thermodynamic conditions of the north zone wells indicated the presence of compressed liquid; it was also noticed that the first response to exploitation consisted in both a pressure drop and enthalpy increase while the long-term response indicated a very small pressure change but a high enthalpy increase. In the south zone, the initial fluid thermodynamic conditions indicated that compressed liquid, and two-phase fluids and vapor occurred at the reservoir depending on the well's depth. The first response to exploitation consisted in a pressure drop and an enthalpy increment, while for the long term, the following patterns have been identified: pressure and mass flow rate drop, boiling, cooling, and vapor production; and in wells affected by reinjection, an increase in both pressure and mass flow rate.*

**Keywords:** Los Azufres geothermal field, fluid thermodynamic conditions.

### Dirección institucional de los autores:

Víctor Manuel Arellano-G

Gerencia de Geotermia,  
Instituto de Investigaciones Eléctricas,  
Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos,  
vag@iie.org.mx

Marco Antonio Torres-R.

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

Rosa María Barragán-R.

Gerencia de Geotermia,  
Instituto de Investigaciones Eléctricas,  
Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos,  
rmb@iie.org.mx

Fabiola N. López-A.

Universidad de las Américas, Puebla