

# Respuesta a la explotación (1982-2003) del yacimiento geotérmico de Los Azufres, Mich. (México). Parte II: Zona Sur

<sup>1</sup>Víctor Manuel Arellano G., <sup>2</sup>Marco Antonio Torres R., <sup>1</sup>Rosa María Barragán R.,  
<sup>2</sup>Fernando Sandoval M.

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113,  
Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, [vag@iie.org.mx](mailto:vag@iie.org.mx)

<sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Residencia Los Azufres,  
Campamento Agua Fría, Los Azufres, Michoacán.

---

## Resumen

En este trabajo se presenta un estudio sobre la evolución termodinámica de los fluidos de la zona sur del yacimiento de Los Azufres, como respuesta a la extracción e inyección de fluidos, desde el inicio de su explotación en 1982 hasta el año 2002. Las condiciones termodinámicas de los fluidos del yacimiento se estimaron 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 sur, indicaron la existencia de líquido comprimido, dos fases con líquido dominante y dos fases con vapor dominante, dependiendo de la profundidad de los pozos. La respuesta inicial 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 fenómenos: disminución de presión y gasto, ebullición, enfriamiento, producción de vapor y en algunos de los pozos afectados por el proceso de inyección un aumento en la presión y en la tasa de producción. Los resultados isotópicos de los fluidos de pozos de la zona sur indicaron la ocurrencia de dos procesos: el primero, de pendiente positiva, indica mezcla entre fluidos del yacimiento y fluidos de reinyección y afecta principalmente a los pozos Az-2, Az-16, Az-33, Az-36 y Az-46; y el segundo, de pendiente negativa, resulta del proceso original de separación de vapor y condensación parcial en el yacimiento.

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

## Response to exploitation (1982-2002) of the Los Azufres, Mich. (Mexico) geothermal field. Part II: South Zone

### Abstract

The paper describes the thermodynamic evolution of fluids in the Los Azufres geothermal field's southern-zone reservoir, as a response to exploitation from 1982 to 2002. Thermodynamic conditions for the reservoir fluids were estimated with production data using the WELFLO heat- and-flow well simulator. In the southern zone, initial fluid thermodynamic conditions indicated that compressed liquid, two-phase fluids and vapor occurred in the reservoir, depending on the well depths. The first response to exploitation consisted in a pressure drop and an enthalpy increase. For the long term, the following patterns have been identified: pressure and mass flow-rate drop, boiling, cooling, vapor production and—in some wells affected by injection—an increase in both pressure and mass flow rate. The isotopic results of well fluids in the southern zone showed the occurrence of two processes. The first, with a positive slope, indicates a mixing of reservoir and injection fluids and mainly affects wells Az-2, Az-16, Az-33, Az-36 and Az-46. The second, with a negative slope, results from the original processes of reservoir steam separation and partial condensation.

**Keywords:** Los Azufres; thermodynamic conditions of fluids; chemical, isotopic and production well data; reservoir engineering; reservoir exploitation.

**1. Introducción**

El campo geotérmico de Los Azufres se localiza aproximadamente a 90 km de la ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán, México (Figura 1). El campo se encuentra en la Sierra de Los Azufres, la cual alcanza elevaciones que exceden los 3200 msnm. Las elevaciones de los cabezales de los pozos perforados varían aproximadamente entre 2750 msnm y más de 3000 msnm. Los valles vecinos están 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: Marítaro 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 (Figura 1). Hasta el año 2002, el campo contaba con una capacidad instalada de 88 MWe (Torres y Flores, 2000; Quijano y Gutiérrez, 2000) y se encontraban en construcción cuatro unidades de 25 MWe cada una. Estas unidades entraron en operación en el año 2003.

En este trabajo se presentan los resultados de estudiar la respuesta de la zona norte del yacimiento a las políticas de explotación (1980-2002), a partir del análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de 13 pozos del campo localizados en esta zona (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).

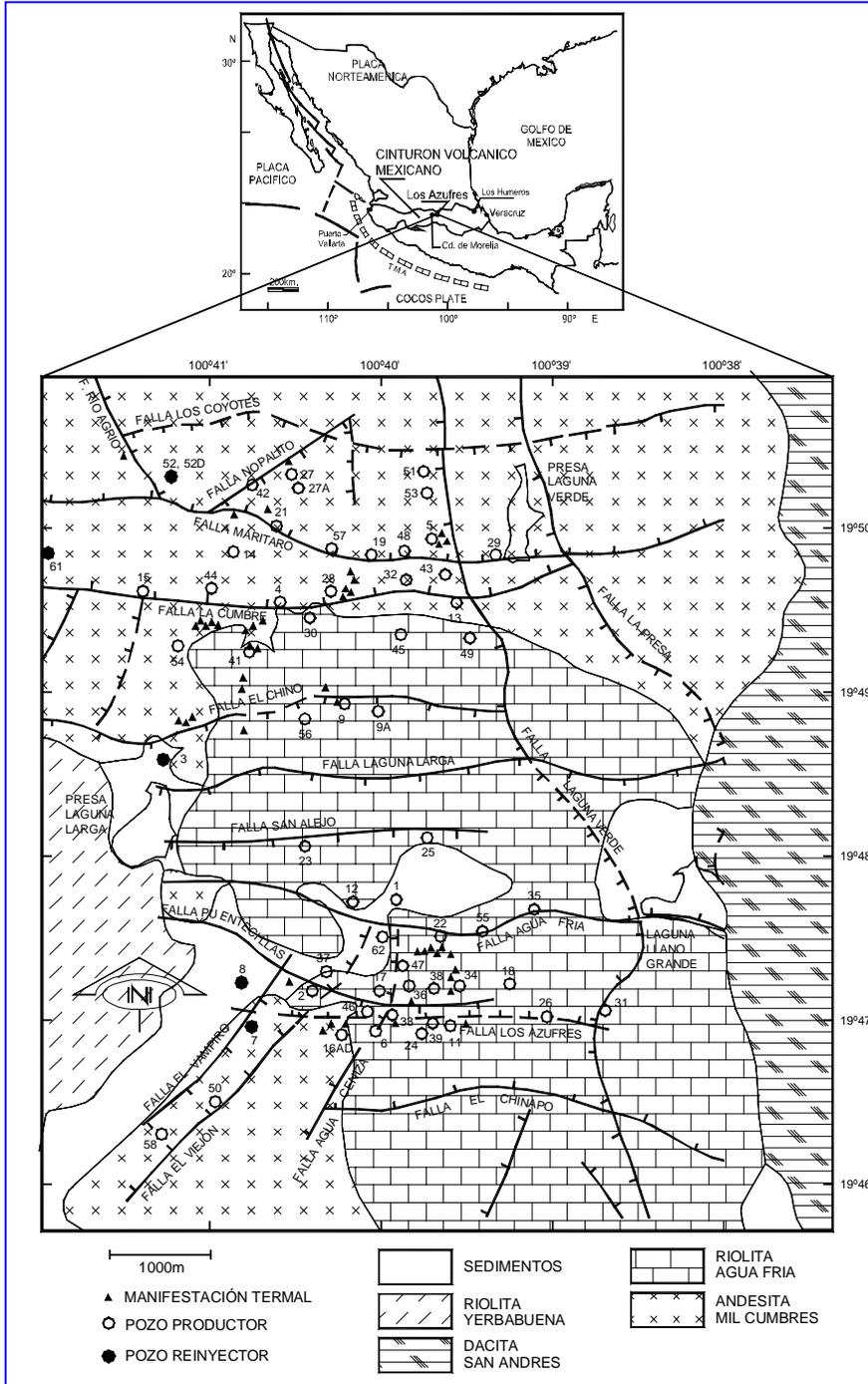


Figura 1. Localización del campo geotérmico de Los Azufres, geología de la zona y ubicación de los pozos.

Los objetivos del análisis fueron: (a) identificar los principales procesos que han ocurrido y que están ocurriendo 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.

Las características geológicas de la zona, el estado inicial del yacimiento de Los Azufres, detalles del yacimiento en producción así como la producción e inyección de fluidos, se describieron en la parte I de este trabajo (Arellano *et al.*, 2004).

## 2. Metodología

Con el fin de identificar los principales procesos que han ocurrido y que están ocurriendo en el yacimiento de Los Azufres, como consecuencia de la extracción de fluidos y calor y de la inyección de fluidos de desecho, 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 13 pozos. En particular, se estudió la evolución de:

- a) La presión, entalpía y temperatura estimadas a fondo de pozo, y el gasto.
- b) La entalpía de la descarga ( $H_{DES}$ ) comparada con 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).
- c) Los cloruros en la descarga total y el agua separada.
- d) Los isótopos  $\delta^{18}O$  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 flujo multifásico, unidimensional y en estado estacionario, 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 a WELFLO son la geometría del pozo (longitud, diámetros, etc.), el flujo másico, la presión y la entalpía de cabezal.

## 3. Resultados: Zona Sur del Campo

En el estado inicial (Figura 2), 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 y un incremento de entalpía. La respuesta a la explotación de largo plazo es mucho más compleja 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.

Como puede apreciarse, en la zona sur los efectos de la reinyección son muy importantes y son los que rigen el comportamiento de muchos de los pozos. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de los pozos Az-2, Az-34 y Az-37 en un diagrama presión entalpía, y como puede verse estos pozos muestran algún incremento de presión y disminución de la entalpía por efecto de la interferencia de los fluidos de reinyección.

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.

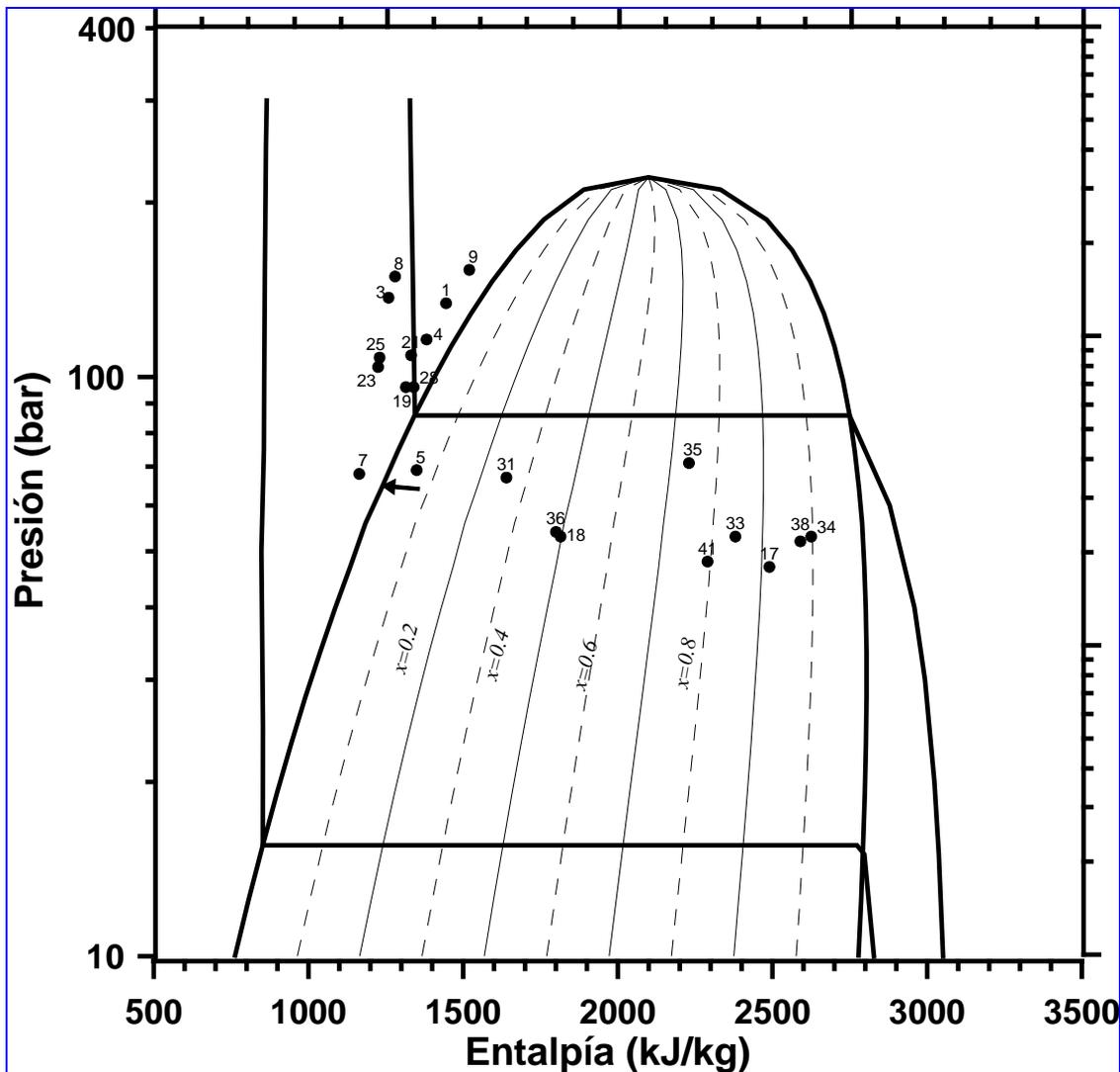


Figura 2.  
Diagrama  
presión-entalpía  
que muestra las  
condiciones  
termodinámicas  
no perturbadas  
de los pozos.

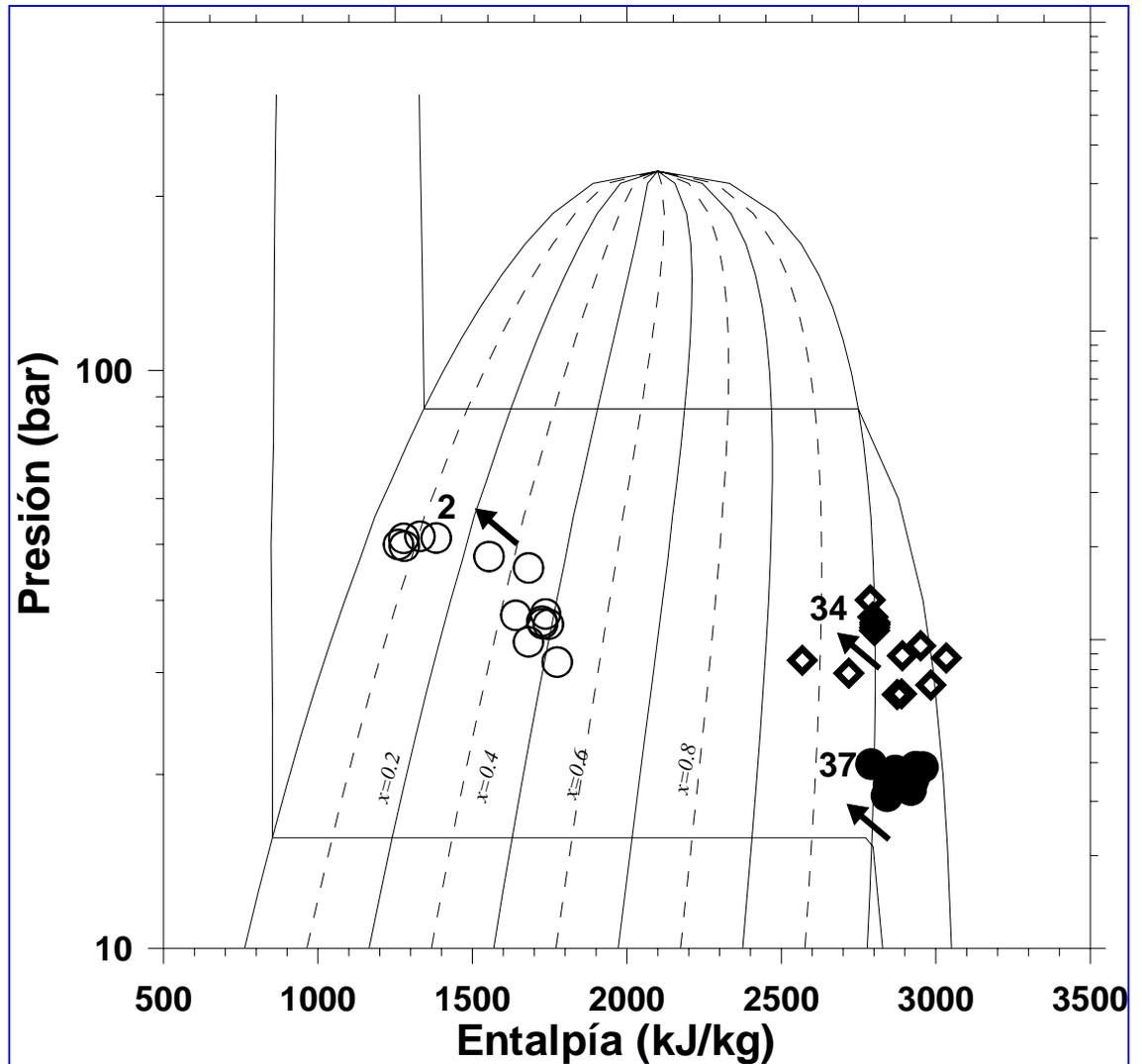
De los pozos estudiados en esta zona del campo, el Az-25 y el Az-26 no parecen recibir fluidos de inyección y desarrollan un proceso de ebullición local (Figura 4). Estos pozos no logran mantener su gasto, la presión a fondo de pozo disminuye y la entalpía se incrementa. De mantenerse esta situación es muy probable que las condiciones a fondo de pozo evolucionen a dos fases vapor dominante y tal vez a vapor sobrecalentado.

Finalmente, en el pozo Az-18 se presenta un proceso de ebullición muy importante.

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.

En la Figura 5 (Barragán *et al.*, 2003) se muestran los valores isotópicos ( $\delta D$  vs  $\delta^{18} O$ ) de los pozos estudiados de la zona sur. En la figura se observa una línea de pendiente positiva que indica la mezcla de fluidos reinyectados y fluidos del yacimiento. Los pozos que presentan un importante efecto de interferencia son: Az-2, Az-33, Az-34, Az-37 y Az-46. La tendencia negativa se debe al fenómeno convectivo de separación de vapor en el yacimiento con condensación parcial, hallado en el estado inicial (Nieva *et al.*, 1987).

Fig. 3. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas de fondo de los pozos Az-2, Az-34 y Az-37. Las flechas indican aumento de la presión y disminución de la entalpía en el tiempo.



#### 4. Conclusiones

El análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de 13 pozos del campo localizados en la zona sur permitió la identificación de los principales procesos que están ocurriendo en el yacimiento como resultado de las políticas de explotación.

La respuesta a la explotación de la zona sur es compleja, 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.

En la zona sur, los efectos de la reinyección 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.

Aún 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.

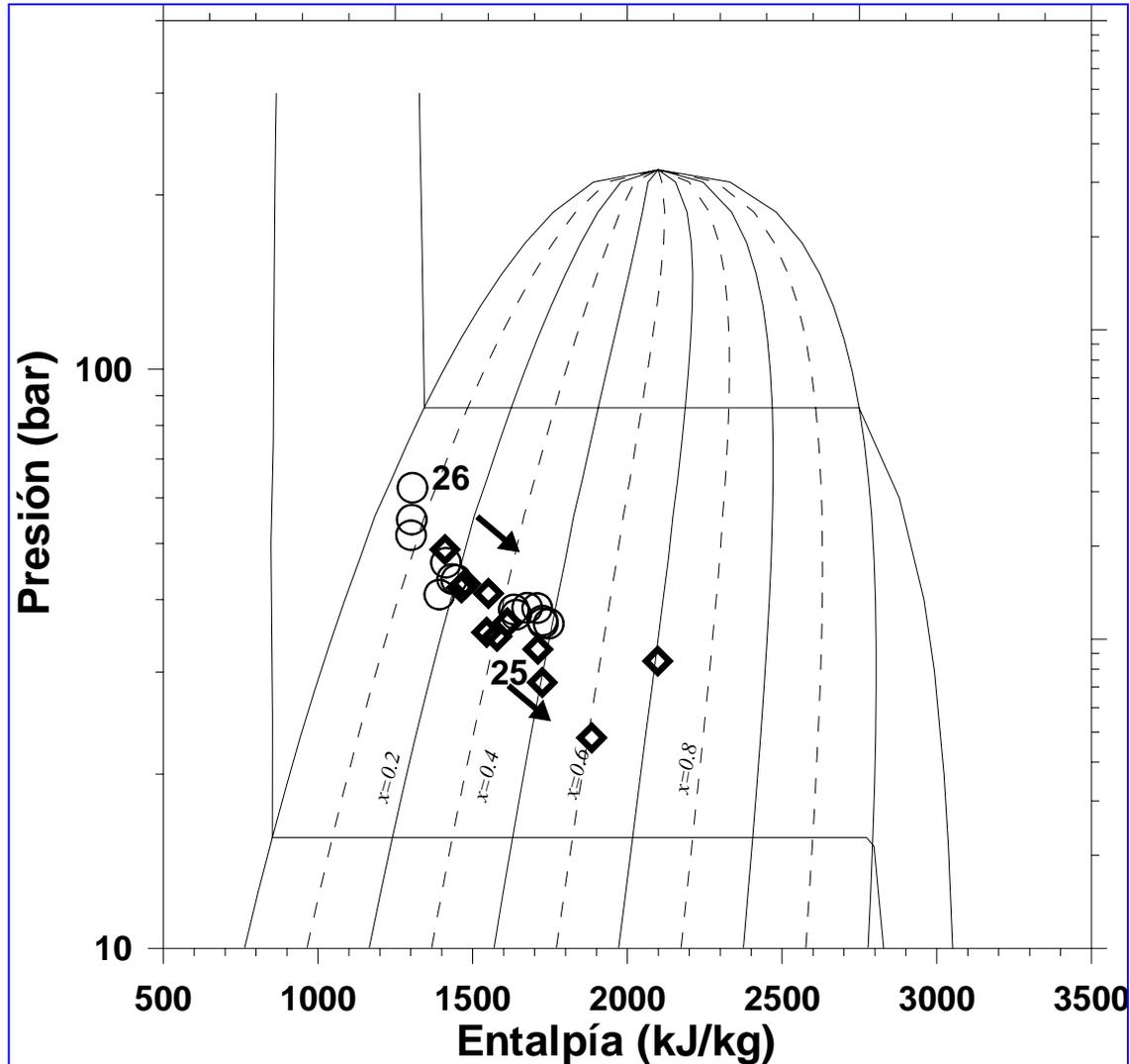


Fig. 4. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas de fondo de los pozos Az-25 y Az-26. Las flechas indican disminución de la presión y aumento de la entalpía en el tiempo.

### 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 CFE 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.

### Referencias

Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, F. Sandoval, R. Lozada (2003). Chemical, isotopic and production well data analysis for the Los Azufres (Mexico) geothermal field. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 27, pp. 275-279.

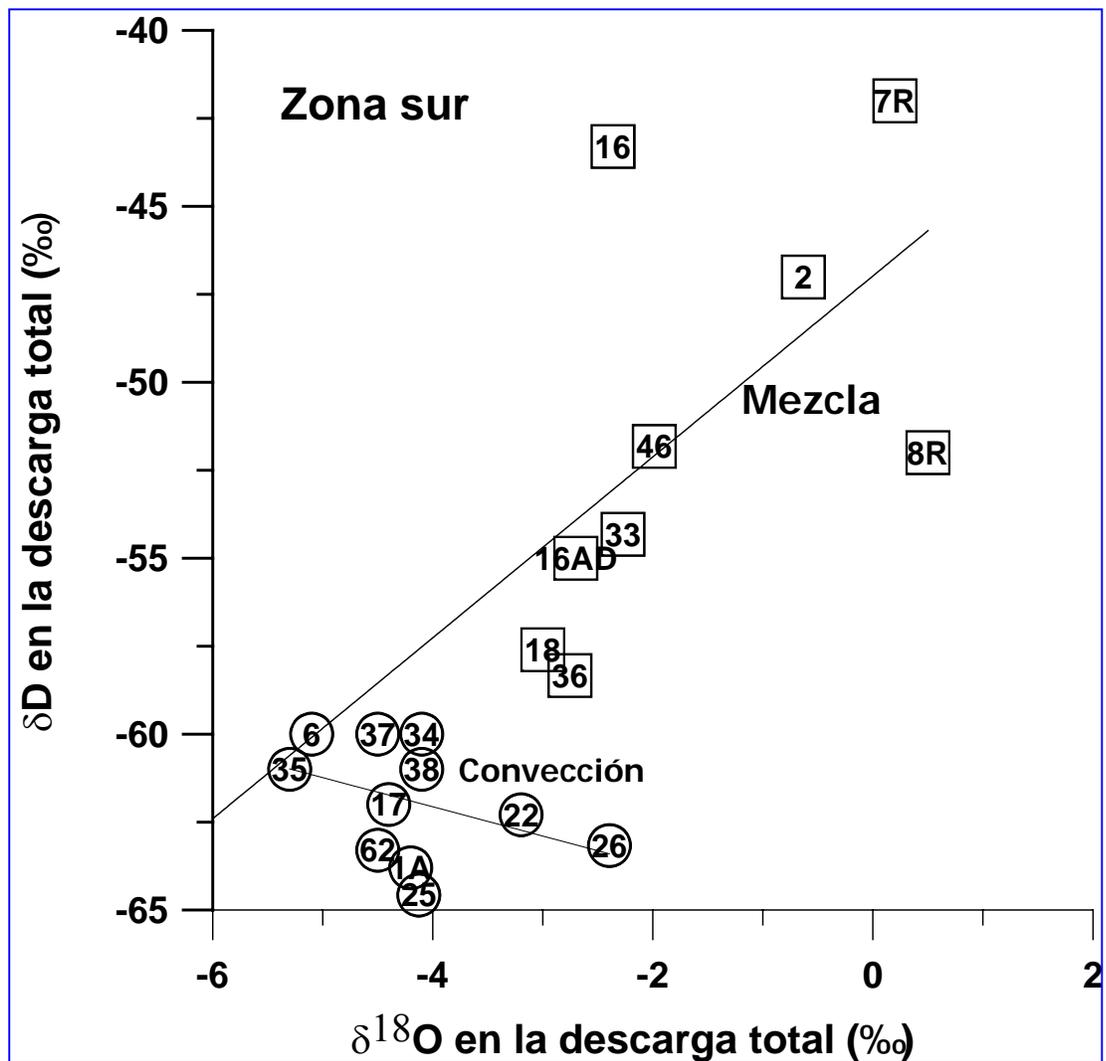


Fig. 5.  $\delta D$  vs  $\delta^{18}O$   
 O de los pozos  
 de la zona sur del  
 campo.

- Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, F. Sandoval (2004). Respuesta a la explotación (1982-2002) del yacimiento geotérmico de Los Azufres Mich., (México). Parte I: Zona norte. *Geotermia Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 16 (1), pp. 11-21.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, R. González, J. Hernández, J. Martínez (2003). Chemical and isotopic ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ) behavior of the Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to exploitation. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 27, pp. 281-285.
- Fournier, R.O., R.W. Potter II (1982). A revised and expanded silica (Quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 3-12.
- Goyal, K.P., C.W. Miller, M.J. Lippmann (1980). Effects of measured wellhead parameters and well scaling on the computed down-hole conditions in Cerro Prieto wells. *Proc. 6th Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, SGP-TR-50, pp. 130-138.
- Nieva, D., R. Nieva (1987). Developments in Geothermal Energy in Mexico - Part Twelve. "A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources". *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 7, No. 3, pp. 243-258.

- Nieva, D., M. Verma, E. Santoyo, R.M. Barragán, E. Portugal, J. Ortiz, J.L. Quijano (1987). Chemical and isotopic evidence of steam up-flow and partial condensation in Los Azufres reservoir. *Proc. 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, pp. 253-259.
- Quijano-León, J.L., L.C.A. Gutiérrez-Negrín (2000). Geothermal production and development plans in Mexico. *Proc. World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 355-361.
- Torres, M.A., M. Flores (2000). Reservoir behavior of the Los Azufres geothermal field, after 16 years of exploitation. *Proc. World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 2269-2275.