

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

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

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113,
Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, vag@iie.org.mx

²Comisión 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 norte del yacimiento de Los Azufres desde el inicio de su explotación en 1982 hasta el año 2002, considerando las condiciones de fondo de pozos del campo, como respuesta a la extracción e inyección de fluidos. 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 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, se observaron cambios muy pequeños en la presión y grandes incrementos en la entalpía. El análisis de datos químicos, isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, δD) y de producción de pozos en la zona norte evidenció la ocurrencia de interferencia de fluidos de reinyección del pozo Az-52 con el pozo Az-5 y del pozo Az-15 con los pozos Az-13, Az-28 y Az-43 aunque actualmente debido al bajo volumen de fluidos que reciben los pozos productores este efecto es mínimo.

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 I: North Zone

Abstract

This work studies the thermodynamic evolution of the Los Azufres northern zone reservoir fluids as a response of exploitation since 1982 to 2002 is presented. Thermodynamic conditions for reservoir fluids were estimated using the WELFLO heat- and flow-well simulator, using production data as the input. The initial thermodynamic conditions of the north zone wells indicated the presence of compressed liquid; also it was noticed that the first response to exploitation was a pressure drop and an enthalpy increase, while the long-term response indicated a very small pressure change but a high enthalpy increment. The analysis of production, chemical and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, δD) data in this zone showed interference effects of fluids reinjected in well Az-52 on well Az-5; and in well Az-15 on wells AZ-13, Az-28 and Az-43. At the present time due to the low injection flow rates, this effect is minimal.

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 siete pozos del campo (Az-4, Az-5, Az-9, Az-13, Az-19, Az-28, y Az-43).

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.

2. 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 (Figura 1):

Andesita Mil Cumbres. Esta unidad se considera como el basamento local y consiste de aproximadamente 3000 m de una secuencia de rocas que varía de andesitas basálticas a dacitas (600 m de basaltos en la base, seguidos de 1700 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, Mich., y cuya edad varía de 0.87 a 0.85 millones de años. No se muestran en la Figura 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 del campo. 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, riolacitas 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 Figura 1 ya que su afloramiento es lejano al área que cubre la figura.

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 (Figura 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, Marítaro, La Cumbre, El Chino, Laguna Larga, San Alejo, Agua Fria, PuenteCillas, 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.

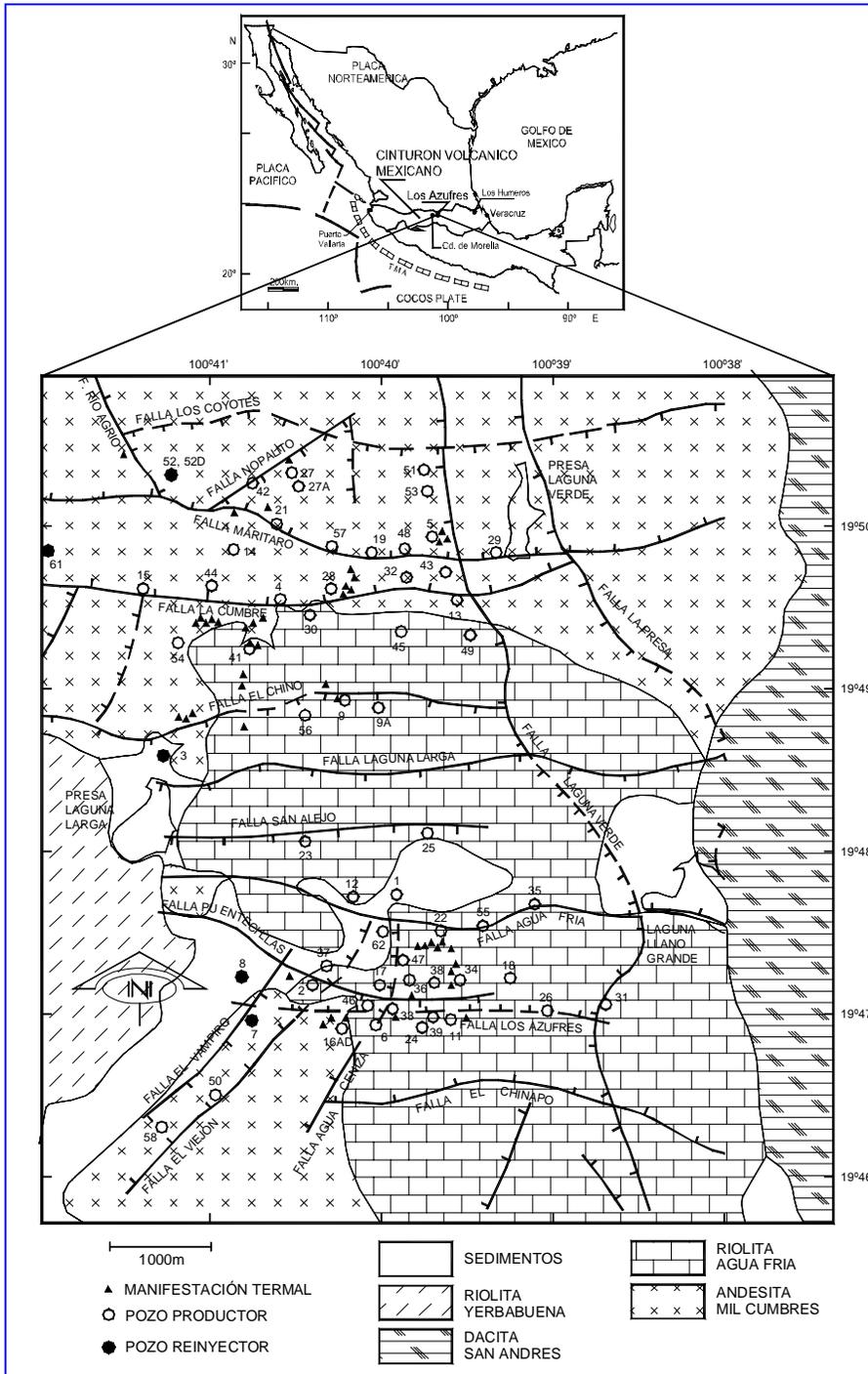


Figura 1. Localización del campo geotérmico de Los Azufres, geología de la zona y ubicación de los pozos.

3. 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) desarrollaron un modelo vertical unidimensional del estado inicial del yacimiento. La Figura 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, el ajuste del modelo PPEP es bueno para un rango de elevaciones que va de 350 a 1800 msnm. Arriba de esta elevación aproximadamente a 1830 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 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 1280 msnm) y caliente (aproximadamente a 303°C). El líquido comprimido profundo asciende hasta que aproximadamente a 1280 msnm comienza a bullir. La región de fluido bifásico dominada por líquido se extiende de 1280 a 1830 msnm, en donde el vapor se convierte en la fase que controla la presión. La región de fluido bifásico dominada por vapor se extiende hacia arriba hasta aproximadamente 2400 msnm. En la Figura 3 se muestra la distribución semi-logarítmica presión-entalpía que sirve de base para estudiar la evolución termodinámica del yacimiento.

4. El Yacimiento en Producción

En 1982 se inició la explotación comercial del campo Los Azufres con la entrada en operación de 5 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 disminuyó la capacidad de generación a 88 MWe (Torres y Flores, 2000). En 2003 entraron en operación cuatro unidades de 25 MWe cada una, con lo cual el campo alcanzó la capacidad de 188 MWe.

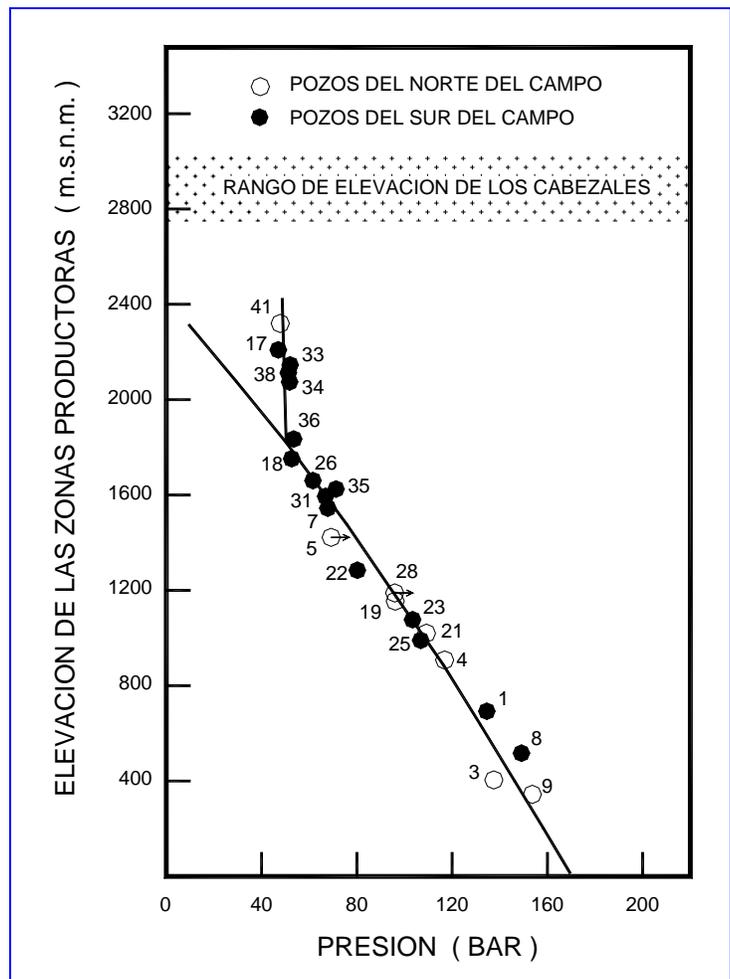


Figura 2. Perfil unidimensional de presión no perturbada (Iglesias *et al.*, 1986).

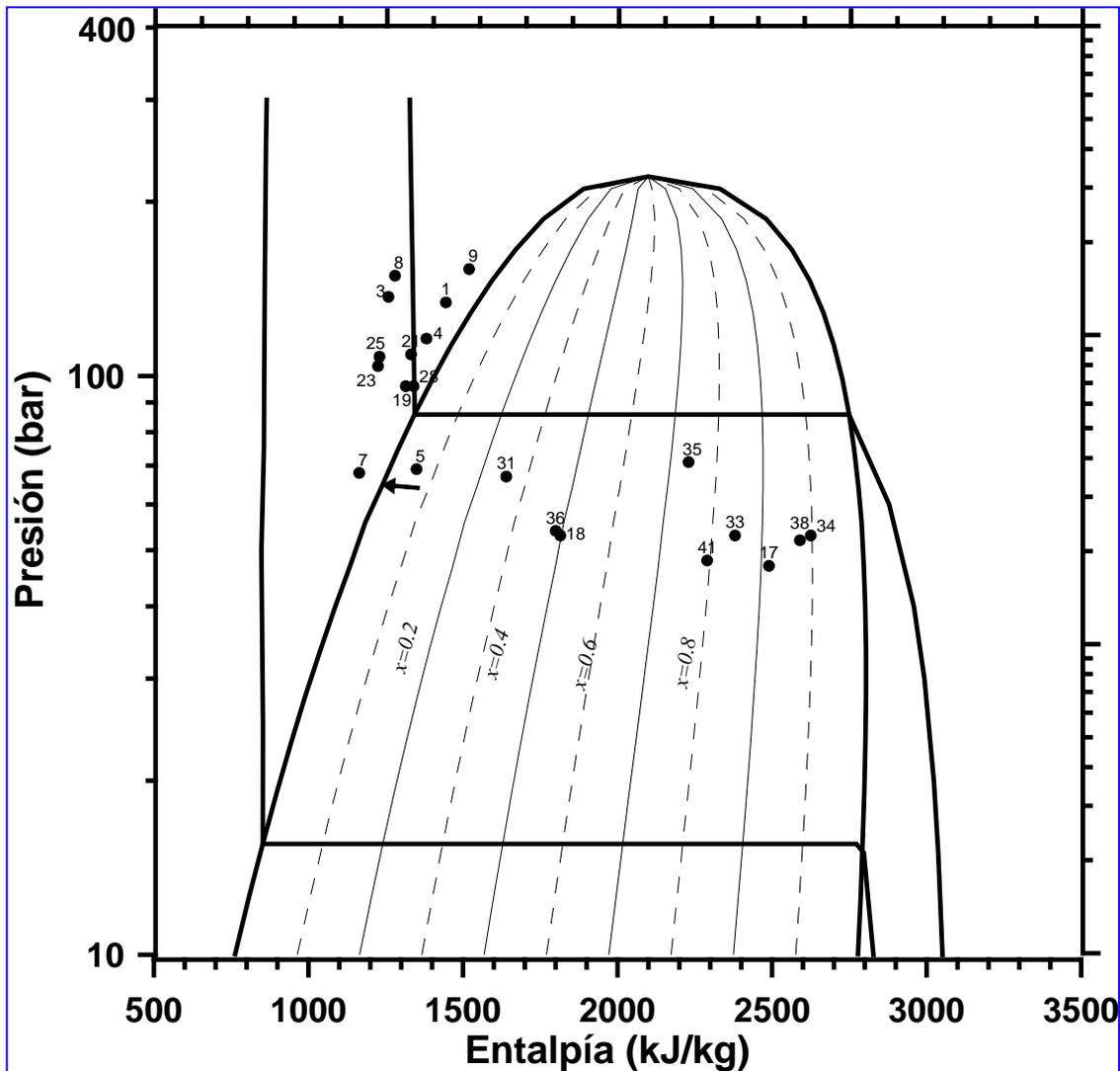


Figura 3.
Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas no perturbadas de los pozos.

5. 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 Figuras 4 y 5 se muestran las historias de producción e inyección de fluidos. La máxima extracción de fluidos (más de 13 Mton/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 10 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.

6. Metodología

Con el fin de identificar los principales procesos que han ocurrido y que están ocurriendo en la zona norte del 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 siete pozos. En particular, se estudió la evolución de:

- 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 δD .

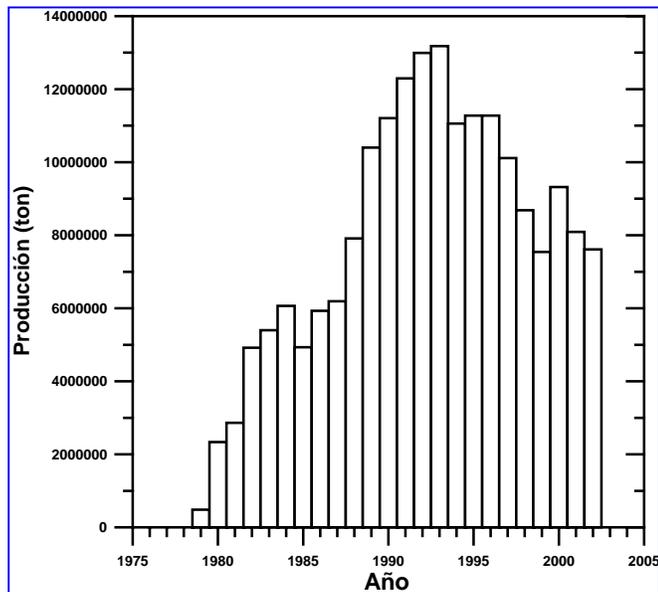


Figura 4. Historial de producción total de fluidos en el campo geotérmico de Los Azufres.

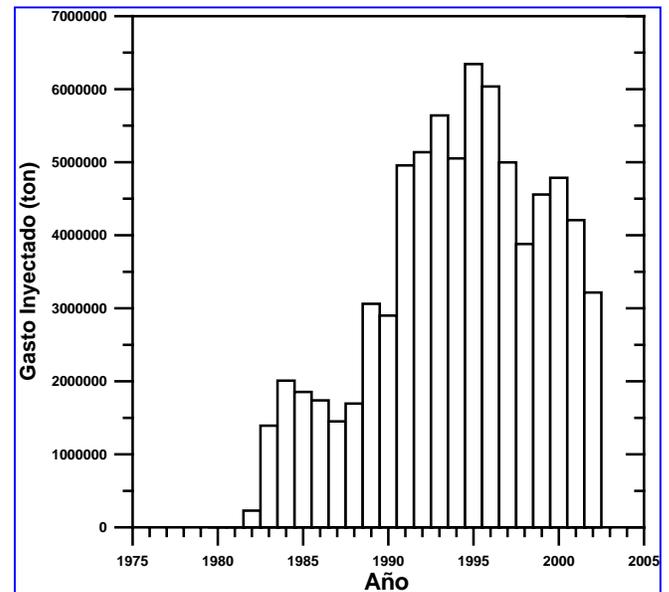


Figura 5. Historial de inyección total de fluidos en el campo geotérmico de Los Azufres.

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 (longitud, diámetros, etc.), el flujo másico, la presión y la entalpía de cabezal.

7. Resultados: Zona Norte del Campo

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 el cual se encuentra localizado en la parte norte del campo. Este pozo tiene una profundidad de 1215 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 (Figura 6), la presión a fondo de pozo disminuye gradualmente (Figura 7) y la entalpía se incrementa significativamente a partir de 1990 (Figura 8). Las entalpías estimadas con los geotermómetros (Figura 9) 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 (Figura 10). Esto indica que actualmente este 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 más importante en el pozo Az-15 (Figura 11). Al disminuir el pico de inyección el gasto disminuye y la entalpía se incrementa. También se observa que el δD sigue bastante bien el comportamiento del fluido inyectado en el pozo Az-15 (Figura 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.

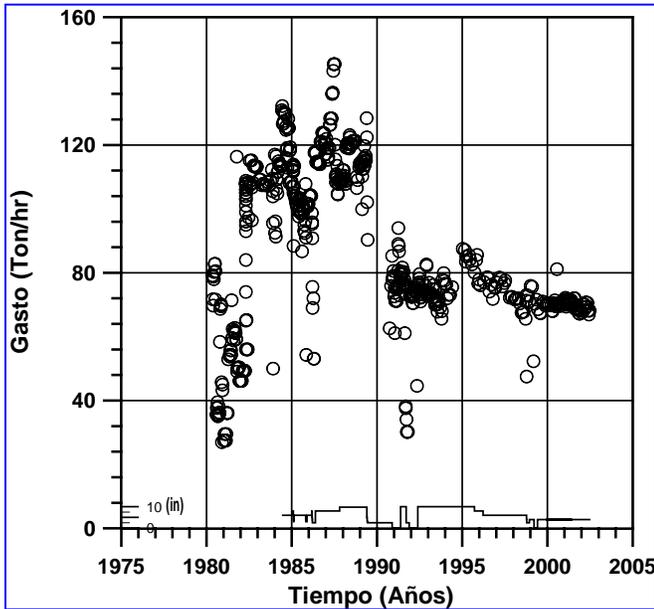


Figura 6. Comportamiento del gasto del pozo Az-13. La línea sólida indica el diámetro del orificio de producción.

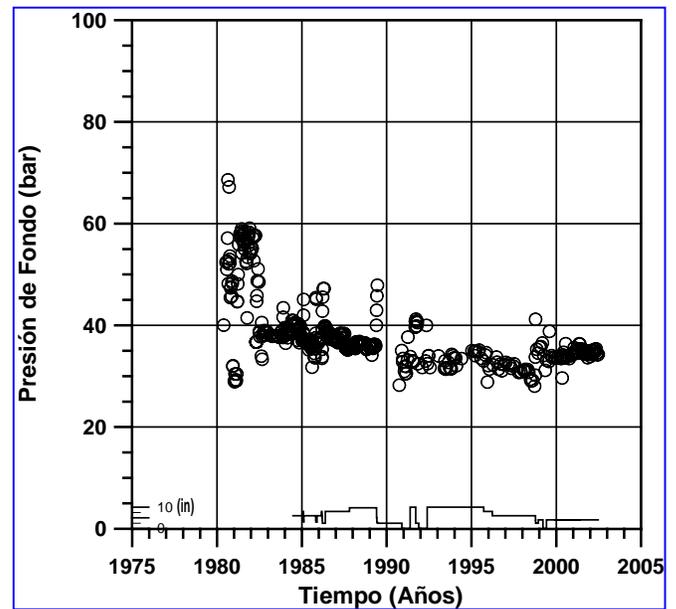


Figura 7. Comportamiento de la presión en el fondo del pozo Az-13 según datos de producción. La línea sólida indica el diámetro del orificio de producción

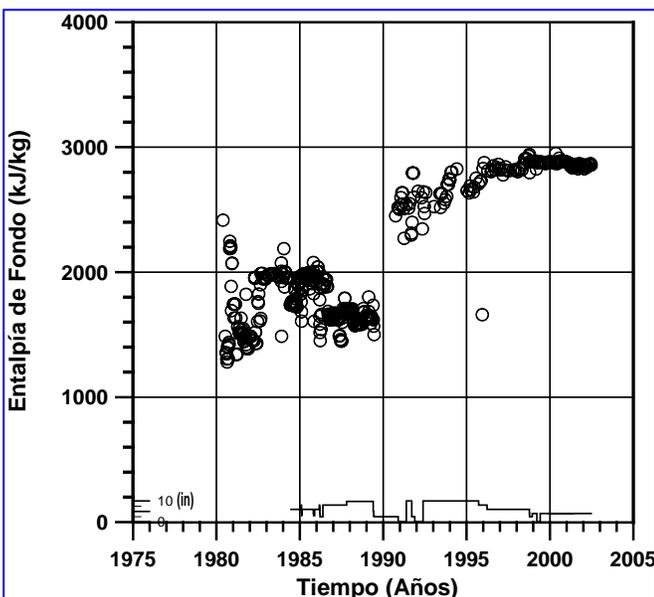


Figura 8. Comportamiento de la entalpía en el fondo del pozo Az-13 calculada con base en los datos de producción. La línea sólida indica el diámetro del orificio de producción.

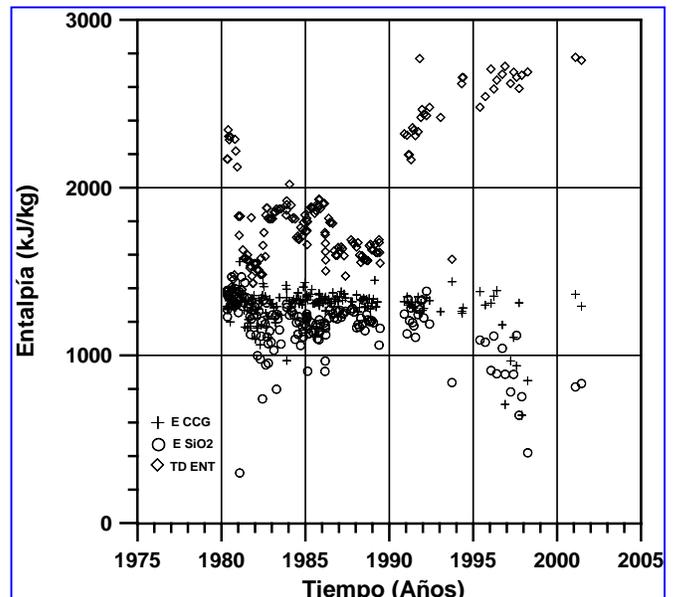


Figura 9. Entalpía de la descarga total y de las entalpías correspondientes a los geotermómetros de composición catiónica y de sílice del pozo Az-13.

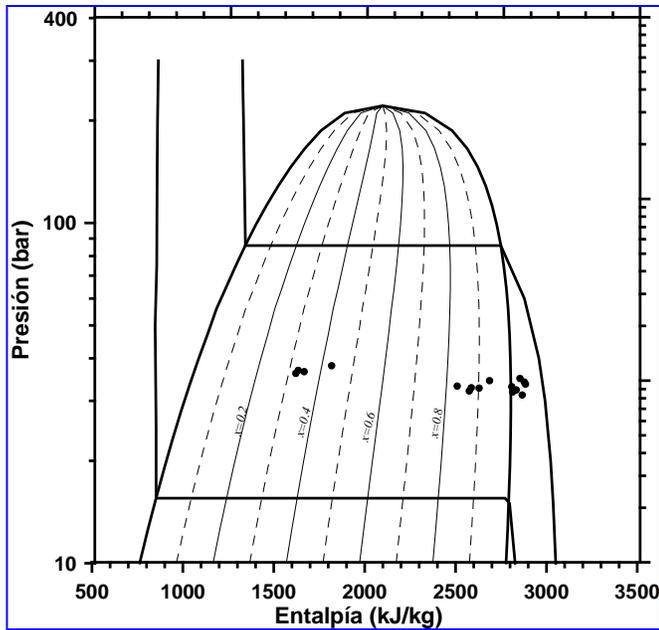


Figura 10. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas en el fondo del pozo Az-13. Los puntos indican los valores promedio anuales.

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.

En la Figura 14 (Barragán *et al.*, 2003) se muestra la composición isotópica de los fluidos de la zona norte del campo según datos de 2002. El ajuste de los datos proporciona una pendiente positiva de 2.8 que indica en general la ocurrencia de un proceso de mezcla entre los fluidos del yacimiento y los fluidos de reinyección.

8. Conclusiones

El análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de siete pozos de la zona norte del campo permitió la identificación de los principales procesos que están ocurriendo 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 con vapor dominante y aún a vapor sobrecalentado.

De la Figura 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, Az-21 Az-28, Az-5). En la Figura 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 Figuras 3 y 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

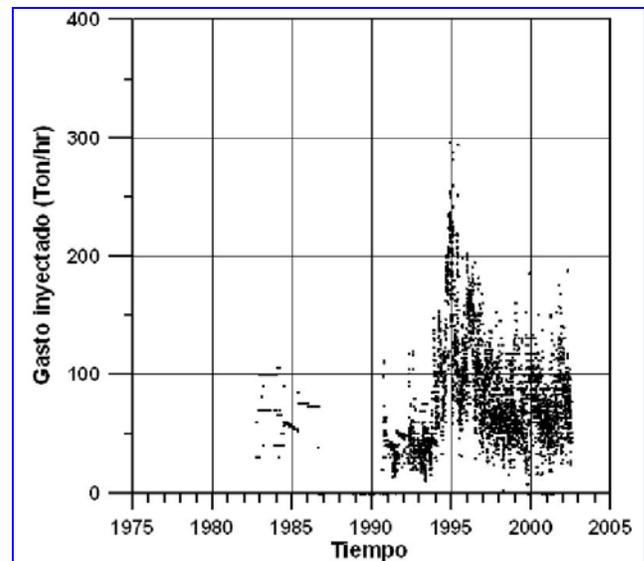


Figura 11. Comportamiento del gasto inyectado en el pozo Az-15.

El análisis de los datos químicos, isotópicos 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 composición isotópica de los fluidos de la zona norte del campo en 2002 indica la ocurrencia de un proceso de mezcla debido a los efectos de la reinyección.

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.

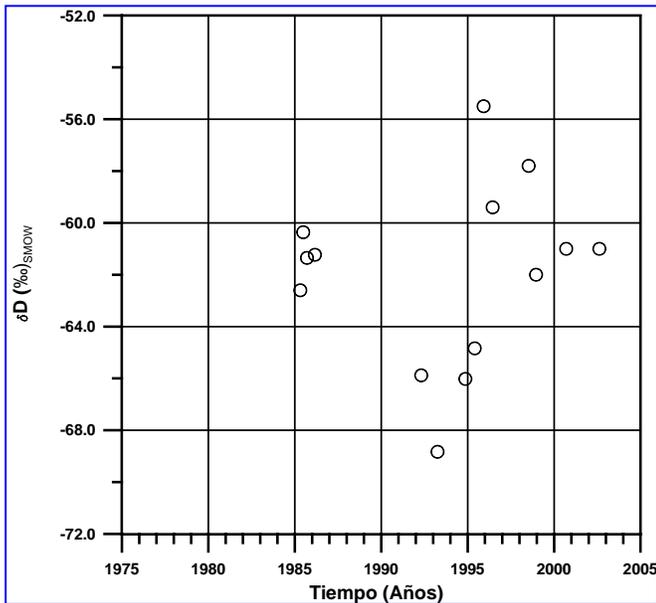


Figura 12. Comportamiento del deuterio en la descarga total del pozo Az-13.

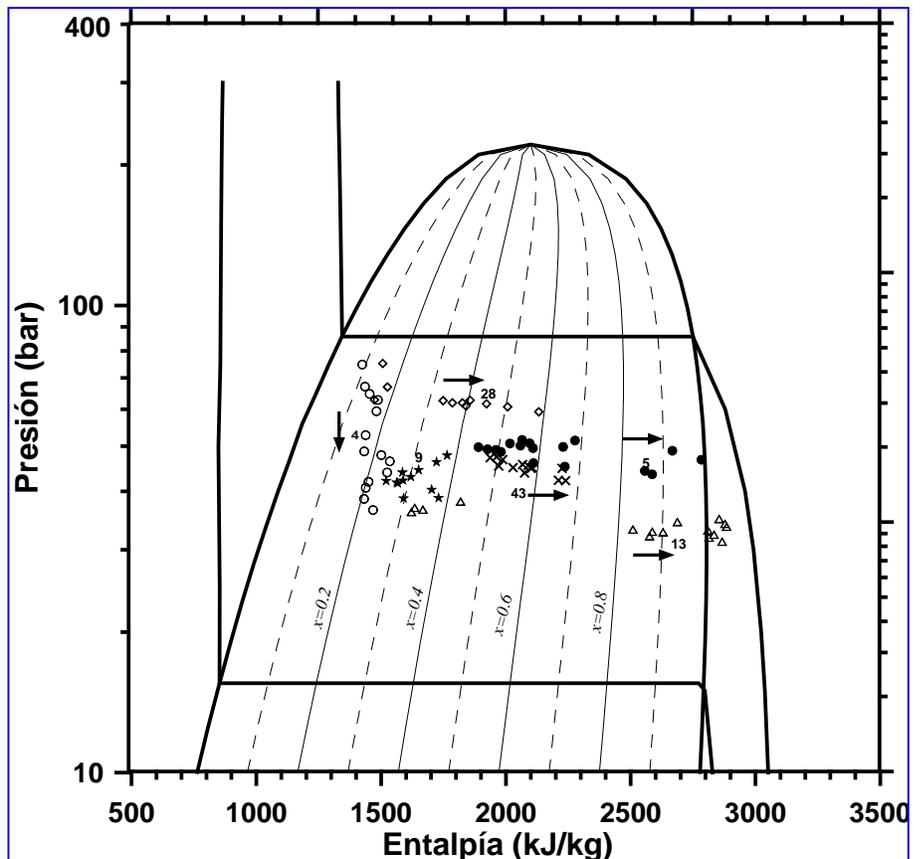


Figura 13. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas de fondo de pozos de la zona norte del campo.

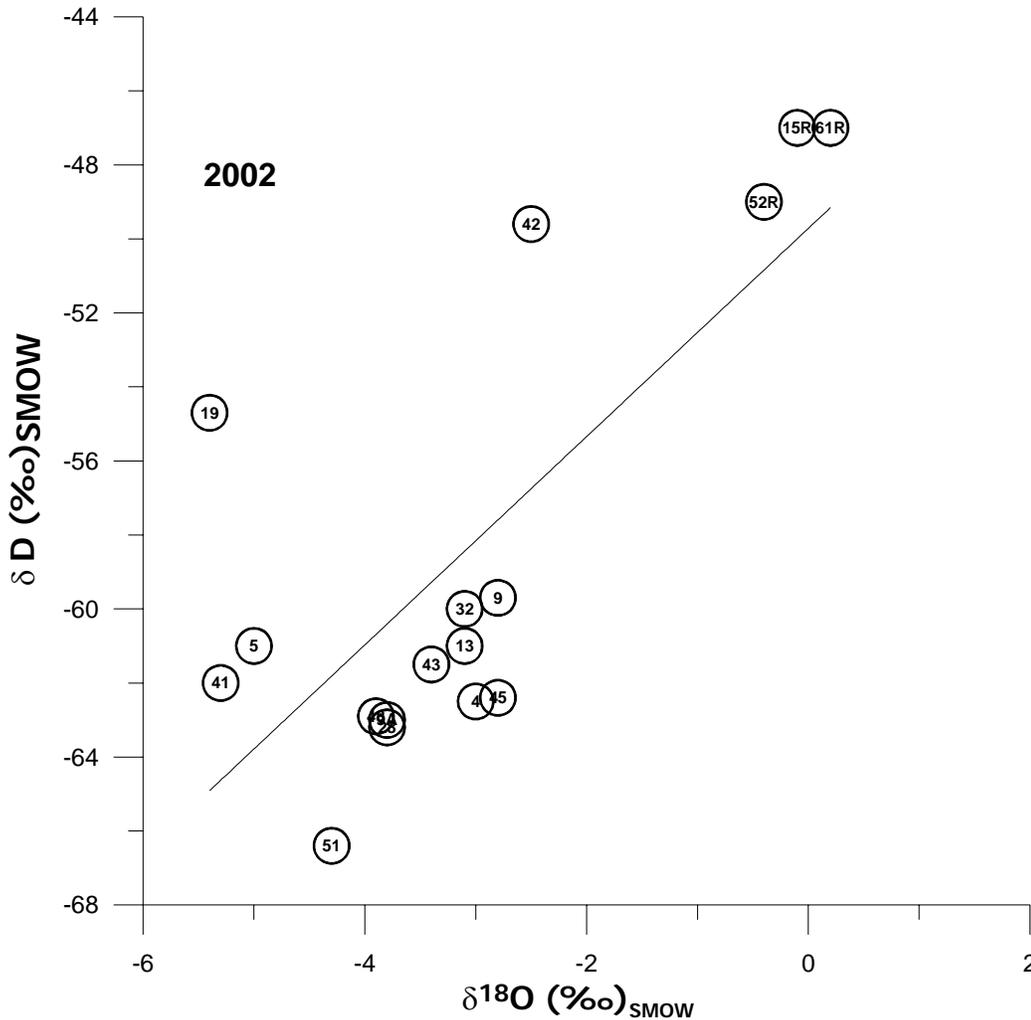


Figura 14. Composición isotópica (δD vs $\delta^{18} O$) de los fluidos de pozos de la zona norte del campo.

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.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, R. González, J. Hernández, J. Martínez, 2003. Chemical and isotopic ($\delta^{18}O$, δD) behavior of the Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to exploitation. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 27, pp. 281-285.
- Cathelineau, M., R. Oliver, D. Nieva, 1987. Geochemistry of volcanic series of the Los Azufres geothermal field (Mexico), *Geofísica Internacional*, Vol. 26, pp. 273-279.
- De la Cruz M., V., S. Aguilar, D. Ortega, 1983. Estudio geológico estructural a detalle del campo geotérmico Los Azufres, Mich. Informe CFE 9/83, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.
- Dobson, P.F., G.A. Mahood, 1985. Volcanic stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 25, pp. 273-287.

- Ferrari, L., V.H. Garduño, G. Pasquarè, A. Tibaldi, 1991. Geology of Los Azufres Caldera, Mexico, and its relationship with regional tectonics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 47, pp. 129-148.
- 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 downhole conditions in Cerro Prieto wells. Proc. 6th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-50, pp. 130-138.
- Grant, M.A., I. Donaldson, P. Bixley, 1982. Geothermal reservoir engineering. Academic Press, New York.
- Iglesias, E.R., V.M. Arellano, A. Garfías, C. Miranda, A. Aragón, 1985. An one-dimensional vertical model of the Los Azufres, México, geothermal reservoir in its natural state. *Geothermal Resources Council, Transactions*, Vol. 9 – part II, pp. 331-336.
- 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. Ortíz, J.L. Quijano, 1987. Chemical and isotopic evidence of steam upflow and partial condensation in Los Azufres reservoir. Proc. 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, pp. 253-259.
- Pradal, E., C. Robin, 1994. Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 63, pp. 201-215.
- Quijano-León J.L., L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 2000. Geothermal production and development plans in México. Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japón, 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, Japón, pp. 2269-2275.