

Patrones de comportamiento de especies químicas e isotópicas (2006-2007) en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., en respuesta a la reinyección

Rosa María Barragán R.¹, Víctor Manuel Arellano G.¹, Ignacio Martínez E.¹, Alfonso Aragón A.¹, Lisette Reyes D.² y Rubí González²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor., México.

²Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia de Los Azufres, Agua Fría, Michoacán, México. Correo: rmb@iie.org.mx.

Resumen

Se analizaron datos químicos e isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) de fluidos de pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., obtenidos en 2006 y 2007, para investigar los cambios ocurridos en sus patrones de comportamiento y su relación con el proceso de reinyección de fluidos al yacimiento. El análisis de los datos comprendió las estimaciones de cloruros en las descargas totales, temperaturas de yacimiento, exceso de vapor en los fluidos de alimentación, las concentraciones de CO_2 en las descargas totales y en la fase líquida del yacimiento y las saturaciones de líquido en la formación. Con los resultados se elaboraron mapas de isovalores de los parámetros mencionados correspondientes a 2006 y 2007 para investigar su evolución con respecto a los mapas obtenidos en 2005, así como su relación con las historias de reinyección. Se correlacionaron las composiciones isotópicas de los fluidos incluyendo los de reinyección para estimar efectos de mezcla de fluidos. Los resultados indican que las variables estudiadas responden a las tasas de reinyección en el campo. Las relaciones δD vs $\delta^{18}\text{O}$ indican que un buen número de pozos del campo producen diferentes proporciones de retornos de reinyección; en la zona norte los pozos AZ-65D, AZ-13, AZ-32, AZ-9A, AZ-9AD, AZ-28A, AZ-69D y AZ-44 producen una mayor proporción mientras que los pozos AZ-5, AZ-28 y AZ-19 entre otros, producen una menor proporción. En la zona sur los pozos AZ-2A, AZ-16AD, AZ-46 y AZ-33 producen relativamente altas proporciones de retornos de reinyección mientras que los pozos AZ-34, AZ-36 y AZ-37 producen menores proporciones. La distribución de saturaciones de líquido hallada en 2007 muestra que las áreas de máxima saturación han disminuido con respecto a las distribuciones de este parámetro en 2005 y 2006. En 2007 las saturaciones máximas de líquido se localizaron alrededor de los pozos AZ-22 y AZ-23 (zona sur) y AZ-28, AZ-32, AZ-45 y AZ-48 (zona norte), mientras que las saturaciones mínimas se localizaron en los pozos AZ-6 y AZ-16 (zona sur) y AZ-56 (zona norte). El CO_2 del líquido del yacimiento mostró ser eficaz para trazar el avance de los fluidos inyectados, agotados en CO_2 , hacia las zonas productoras de los pozos.

Palabras clave: Geoquímica de fluidos, inyección, isotopía, Los Azufres, saturación de líquidos.

Behavior patterns of chemical and isotopic species (2006-2007) in the Los Azufres, Mich., geothermal field, as a response to reinjection

Abstract

Chemical and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) data from the Los Azufres geothermal field fluids for 2006 and 2007 were analyzed to investigate changes in their behavior patterns and their relation to reinjection. Total discharge chlorides, reservoir temperatures, excess steam in well feeding fluids, CO_2 concentrations at reservoir and total discharge conditions, and liquid saturations were calculated. Contour lines of certain

parameters were obtained for 2006 and 2007 to relate them to the contours obtained for 2005 and to the reinjection histories. Fluid isotopic compositions, including injection fluids, were correlated to estimate fluid mixing effects between the reservoir and reinjection fluids. Results suggest chemical parameters respond to the mass flow rate injected and to the isotopic composition of injection fluids. δD vs $\delta^{18}O$ relationships show a number of wells produce different proportions of reinjection returns. In the northern zone, wells AZ-65D, AZ-13, AZ-32, AZ-9A, AZ-9AD, AZ-28A, AZ-69D and AZ-44 produce relatively high proportions, while wells AZ-5, AZ-28 and AZ-19, among others, produce lower proportions. Wells AZ-2A, AZ-16AD, AZ-46 and AZ-33 from the southern field zone produce higher proportions of reinjection returns while wells AZ-34, AZ-36 and AZ-37 produce lower proportions. The liquid saturation distribution in 2007 shows the maximum saturation zones have decreased compared with 2005 and 2006 data. In 2007, maximum liquid saturations were found around wells AZ-22 and AZ-23 (southern zone) and AZ-28, AZ-32, AZ-45 and AZ-48 (northern zone). Minimum saturations were found around wells AZ-6 and AZ-16 (southern zone) and AZ-56 (northern zone). The CO_2 levels for the reservoir liquid were used to trace paths of reinjection fluids, considering these fluids are depleted in this gas. Thus the minimum CO_2 contour lines indicate the movement of the reinjection fluids in the reservoir.

Keywords: Fluid geochemistry, injection, isotopic composition, Los Azufres, liquid saturation.

1. Introducción

El yacimiento de Los Azufres se ha explotado exitosamente para generar electricidad desde 1982, contando actualmente con una capacidad instalada de 188 MW (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2005). Con objeto de inferir la ocurrencia de procesos de yacimiento debidos a la explotación, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realiza el monitoreo sistemático de especies químicas e isotópicas de los fluidos producidos (Barragán *et al.*, 2003; 2005a) así como de las condiciones termodinámicas del yacimiento (Arellano *et al.*, 2003; 2005).

Considerando que en Los Azufres la reinyección de la salmuera residual se ha efectuado prácticamente de manera simultánea a la explotación y que ha tenido efectos benéficos al yacimiento (Gutiérrez Puente y Suárez Arriaga, 1992; Torres-Rodríguez y Flores-Armenta, 1998; 2000) es importante investigar la evolución de los patrones geoquímicos de comportamiento de los fluidos producidos y su relación con los patrones de reinyección para investigar su influencia en el tiempo.

La presencia de retornos de reinyección en los fluidos producidos por pozos de la zona norte del campo fue inferida por Arellano *et al.* (2002; 2003), mientras que Iglesias *et al.* (2006) confirmaron los resultados mediante la inyección de trazadores. Anteriormente sólo se había identificado el efecto de la reinyección en pozos de la zona sur.

El objetivo de este trabajo es identificar los patrones de comportamiento de especies químicas e isotópicas de fluidos de pozos y correlacionarlos con las tasas de reinyección para continuar la investigación de los procesos del yacimiento de Los Azufres como respuesta a la reinyección de fluidos. Este estudio se realizó utilizando datos químicos de 2005, 2006 y 2007 y datos isotópicos de 2006 y 2007. En la Figura 1 se muestra la localización de pozos en el campo.

Metodología

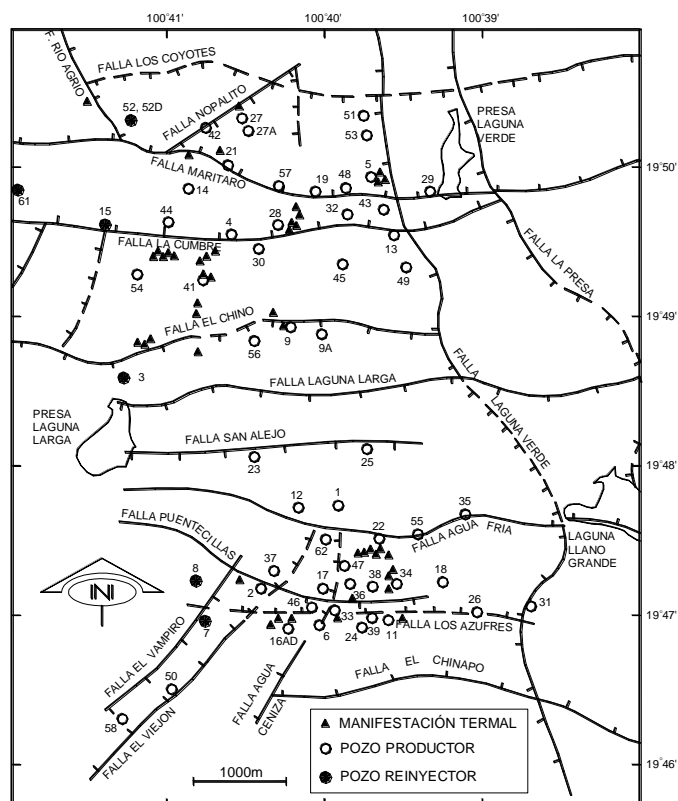


Fig. 1. Localización de pozos en Los Azufres

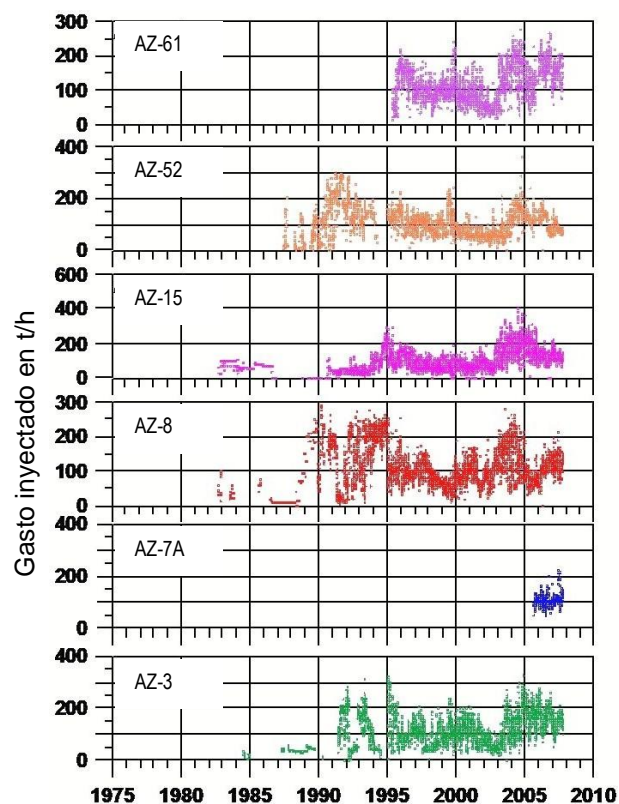


Fig. 2. Historial de inyección en Los Azufres

Se calcularon valores promedio anuales para 2005, 2006 y 2007 de los cloruros en la descarga total y de los geotermómetros Na/K (Nieva and Nieva, 1987) en los pozos que producen líquido y FT-HSH2 (Barragán *et al.*, 2005b) en los pozos productores de vapor, para elaborar diagramas de distribución de isovalores en el campo. Se estimaron las concentraciones de CO₂ en la descarga total y en la fase líquida del yacimiento utilizando la subrutina SCEXVAP (Nieva *et al.*, 1987) y se elaboraron diagramas de distribución anuales. Se calcularon las saturaciones volumétricas de líquido de acuerdo al método establecido por D'Amore y Truesdell (1995), utilizando las estimaciones de temperatura descritas y los excesos de vapor proporcionados por el programa SCEXVAP.

Las distribuciones de $\delta^{18}\text{O}$ y de δD obtenidas en 2006 y 2007 se interpretaron junto con las distribuciones de los parámetros mencionados así como con las tasas de reinyección para investigar sus efectos en los pozos productores.

Como referencia, en la Figura 2 se presentan las historias actualizadas de reinyección en los pozos AZ-3, AZ-7A, AZ-8, AZ-15, AZ-52 y AZ-61. Los pozos AZ-7A y AZ-8 se localizan en la zona sur y los pozos AZ-3, AZ-15, AZ-52 y AZ-61 se localizan en la zona norte.

Resultados

La Figura 3 muestra las distribuciones de temperatura de yacimiento según datos promedio de 2005, 2006 y 2007. Los resultados indican que la temperatura de yacimiento responde a las tasas reinyectadas en el campo. Se puede observar que para el año 2006 (centro) las temperaturas promedio son menores que para 2005 (izquierda) y 2007 (derecha), lo cual parece ser un efecto del hecho de que en 2006 hubo una mayor inyección (Figura 2).

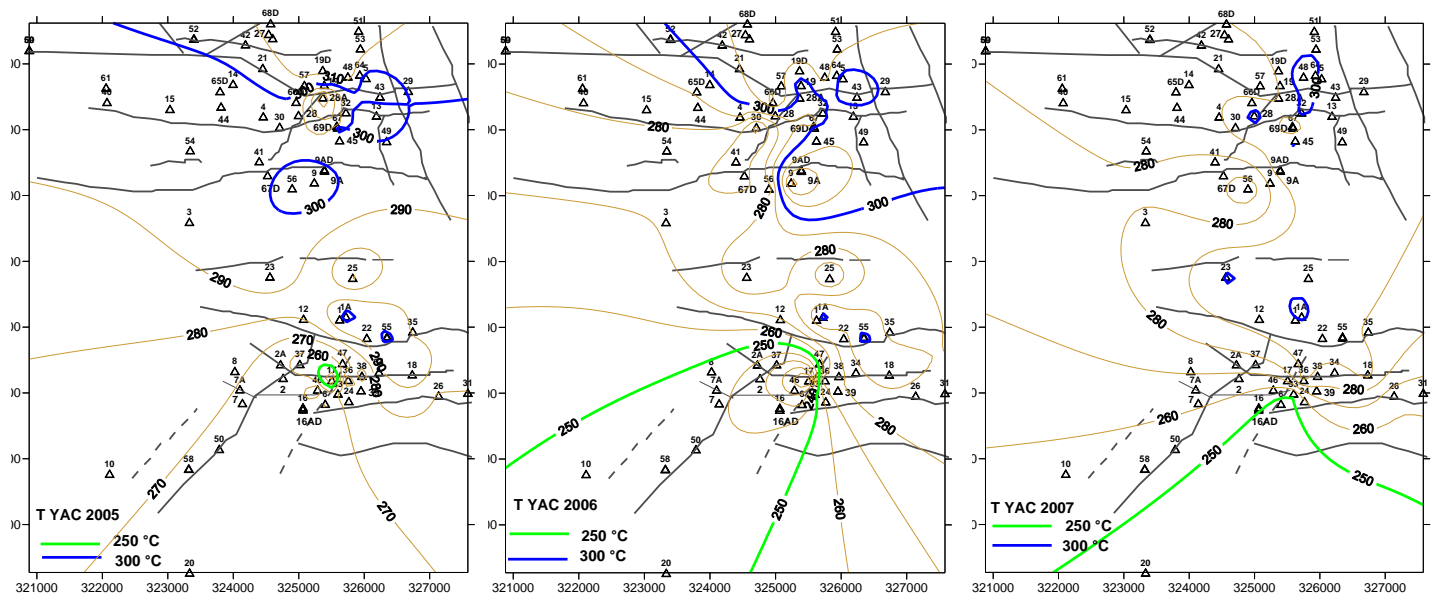


Fig. 3. Comparación de temperaturas promedio del yacimiento en 2005 (izquierda), 2006 (centro) y 2007 (derecha).

Las isóclinas de cloruros de la descarga total para 2005, 2006 y 2007 se muestran en la Figura 4. Los cloruros de la descarga total de los fluidos producidos en 2006 (Fig. 4, centro) también mostraron una mayor concentración que en los fluidos producidos en los años 2005 (Fig. 4, izquierda) y 2007 (Fig. 4, derecha). Esto implica que en general en 2006 los fluidos producidos contenían una proporción mayor de retornos de reinyección.

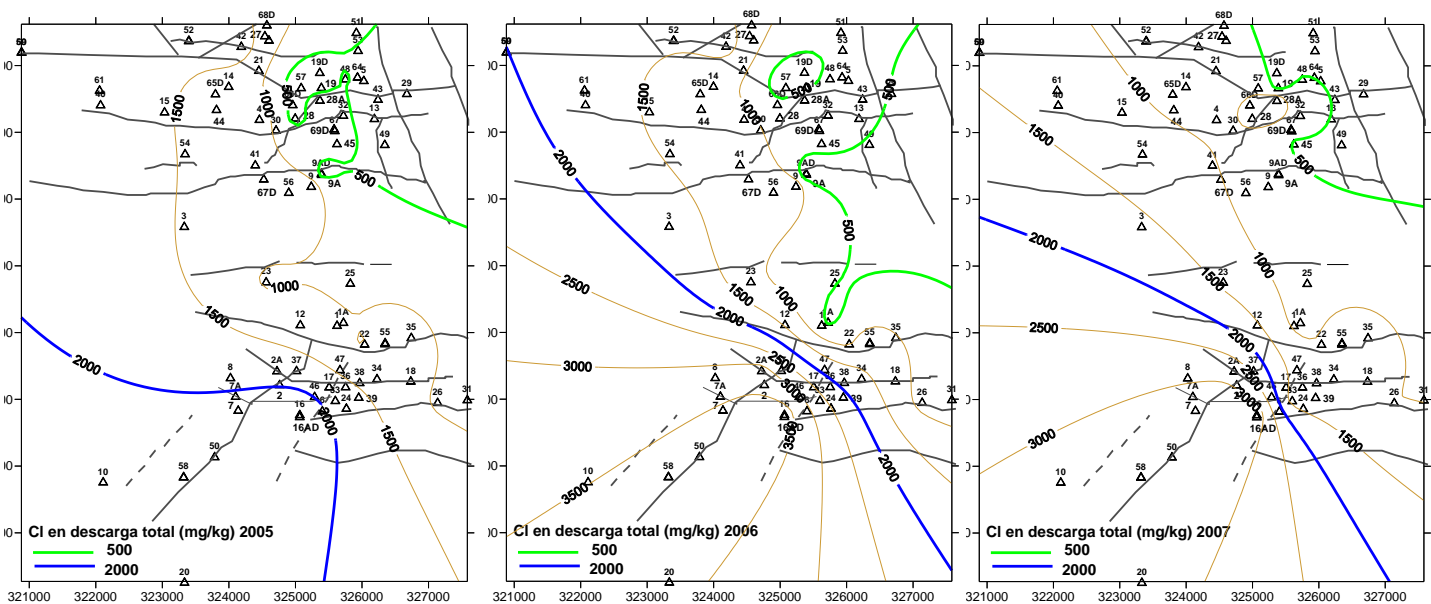


Fig. 4. Comparación de la distribución promedio de cloruros en la descarga total en 2005 (izquierda), 2006 (centro) y 2007 (derecha)

De los parámetros obtenidos a partir de la fase gaseosa, el CO₂ del líquido del yacimiento resultó ser un parámetro eficaz para trazar el avance de los fluidos reinyectores (agotados en CO₂ del líquido del yacimiento) hacia las zonas productoras de los pozos. Su distribución en el campo en 2005, 2006 y 2007 (Figura 5) indica prácticamente la influencia de la reinyección, desde la zona oeste donde se localizan los

pozos de reinyección con valores despreciables, hacia el resto del campo. Las distribuciones en 2005 y 2006 mostraron el avance de los fluidos de reinyección con dirección oeste-este mientras que en 2007 las isolíneas muestran un avance de tipo radial en la zona norte como resultado de una disminución de las tasas de reinyección en esa zona en 2007, aunque el efecto de los fluidos reinyectados en los pozos AZ-3, AZ-7A y AZ-8 es muy notable en la distribución.

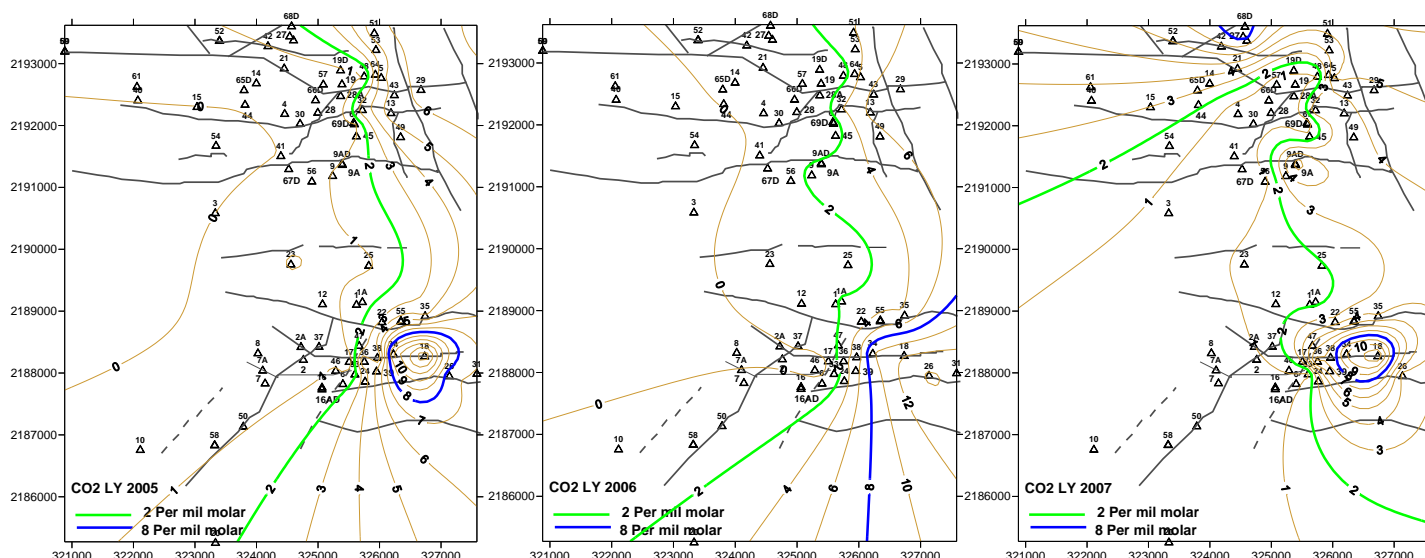


Fig. 5. Distribuciones del CO₂ en el líquido del yacimiento en 2005 (izquierda), 2006 (centro) y 2007 (derecha)

Las distribuciones de saturación de líquido en la formación, correspondientes a los años 2005, 2006 y 2007, se presentan en la Figura 6. De acuerdo a la distribución de 2005 (izquierda), se observa que las saturaciones más altas se localizan en una gran área del centro de la zona norte, mientras que en la zona sur las saturaciones máximas se localizan en la parte central norte (pozos AZ-1A, AZ-22 y AZ-55). Hacia el norte de la zona norte se nota un decremento drástico, localizándose ahí las mínimas saturaciones. En contraste, en la zona sur las saturaciones mínimas se hallan en los pozos cercanos a los reinyectores AZ-7A y AZ-8.

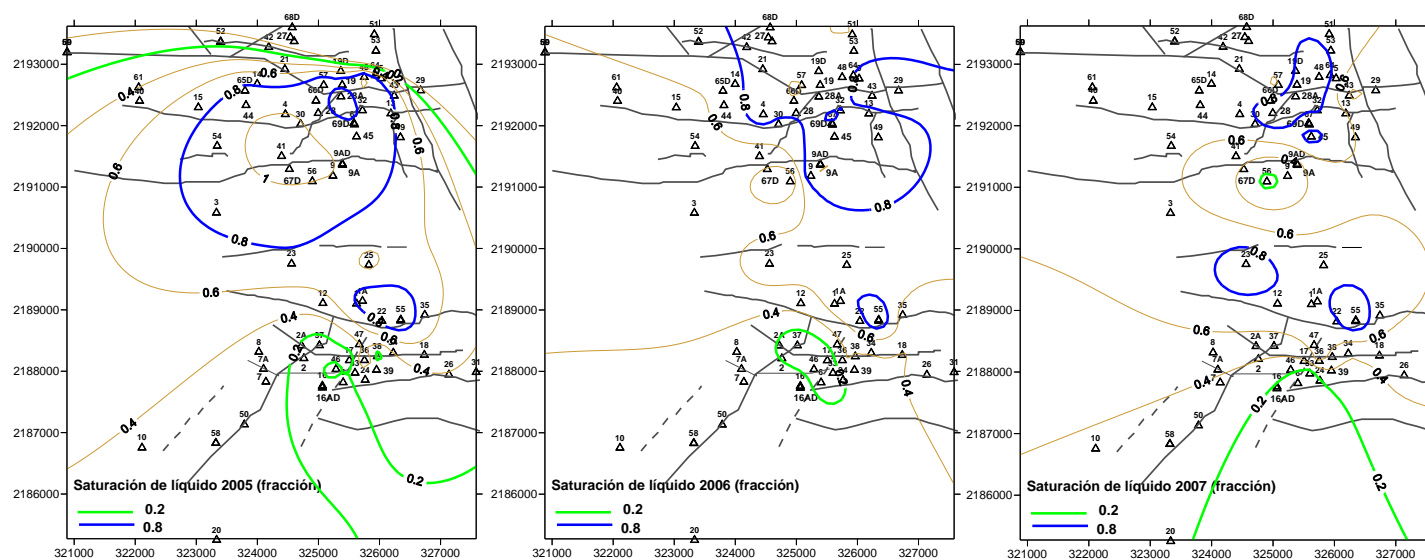


Fig. 6. Distribución de la saturación de líquido en la formación para 2005 (izquierda), 2006 (centro) y (2007)

Para el año 2006 (Fig. 6, centro) las saturaciones mínimas de la zona sur cubren un área mayor que en 2005, mientras que en la zona norte predominan saturaciones altas sin el decremento observado en 2005. La distribución de saturaciones de 2007 (Fig. 6, derecha) muestra una disminución de las áreas de máxima saturación con respecto a 2005 y 2006. En 2007 las saturaciones máximas de la zona sur se localizan alrededor de los pozos AZ-22 y AZ-23, y en la zona norte alrededor de los pozos AZ-28, AZ-32, AZ-45 y AZ-48. Las saturaciones mínimas de 2007 se localizan en la zona sur, en los pozos AZ-6 y AZ-16 y en la zona norte alrededor del pozo AZ-56.

El comportamiento isotópico ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) de los fluidos producidos en 2006 y a 2007 también reflejó la respuesta del yacimiento a la extracción y reinyección de fluidos, en concordancia con los resultados comentados del análisis de datos químicos. La distribución de la composición del $\delta^{18}\text{O}$ en los fluidos producidos en 2006 (Figura 7, izquierda) presenta en general valores más enriquecidos que en 2007 (Figura 7, derecha), como resultado de las relativamente altas tasas de reinyección ocurridas en 2006 (Figura 2).

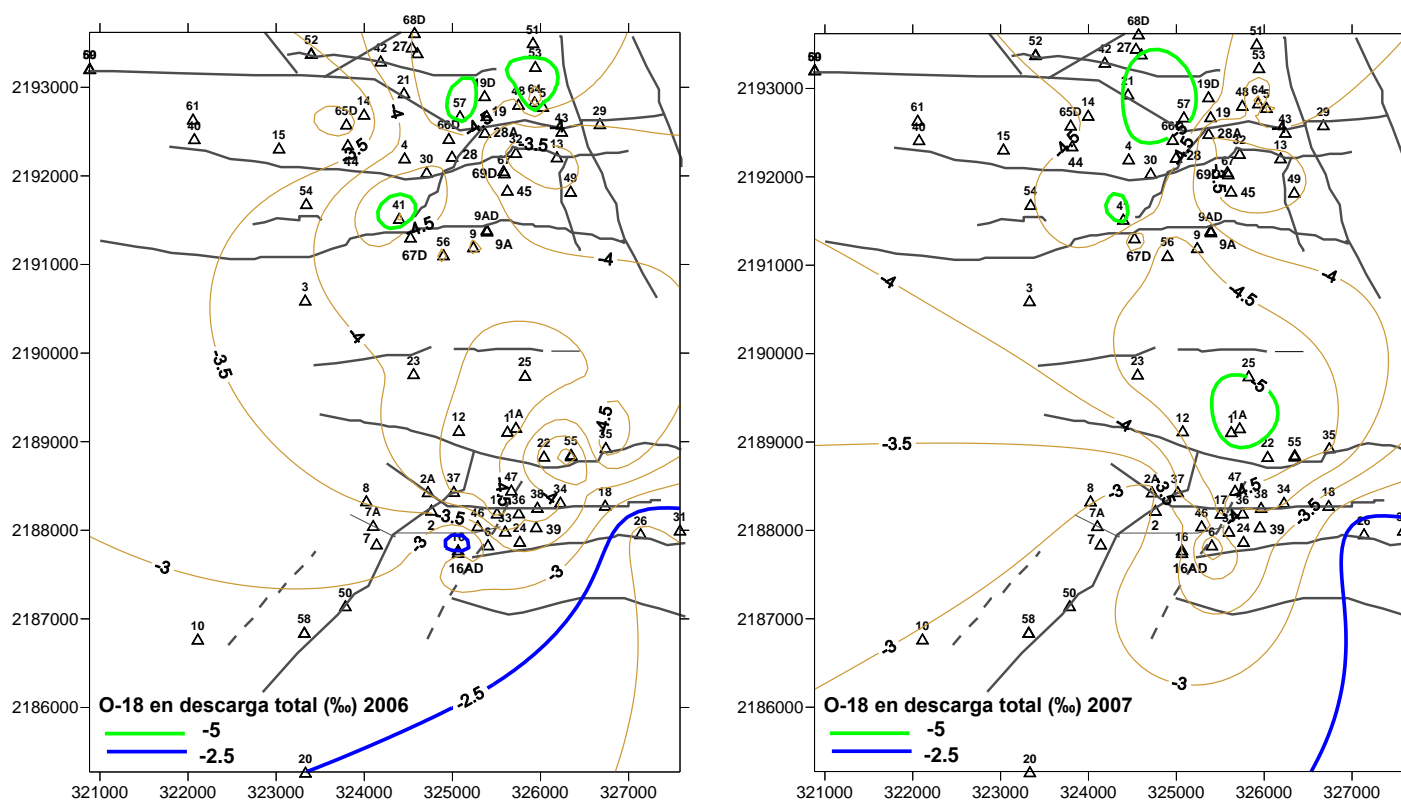


Fig. 7. Distribución de $\delta^{18}\text{O}$ en la descarga total para 2006 (izquierda) y 2007 (derecha)

Respecto a la distribución de δD de los fluidos producidos, en 2006 (Figura 8, izquierda) los valores también se notaron más enriquecidos que en 2007 (Figura 8, derecha) principalmente en la zona sur del campo. Esto se atribuyó tanto a las altas tasas de reinyección ocurridas en 2006 como a que en 2007 la composición isotópica de los fluidos reinyectados en los pozos AZ-7A y AZ-8 fue más ligera que en 2006. En la zona norte según la distribución de δD de 2007 también se notaron valores más ligeros que en 2006, lo que se relacionó con disminuciones en las tasas de reinyección en los pozos así como con una composición isotópica más ligera de los fluidos inyectados (con excepción del pozo AZ-52) en comparación con 2006.

Las relaciones δD vs $\delta^{18}\text{O}$ halladas indican que un buen número de pozos producen una mezcla de fluidos con características isotópicas diferentes. Los componentes de la mezcla son, por un lado, los fluidos propios

del yacimiento con una composición isotópica relativamente más ligera, y por otro los fluidos de la reinyección que tienen una composición isotópica enriquecida.

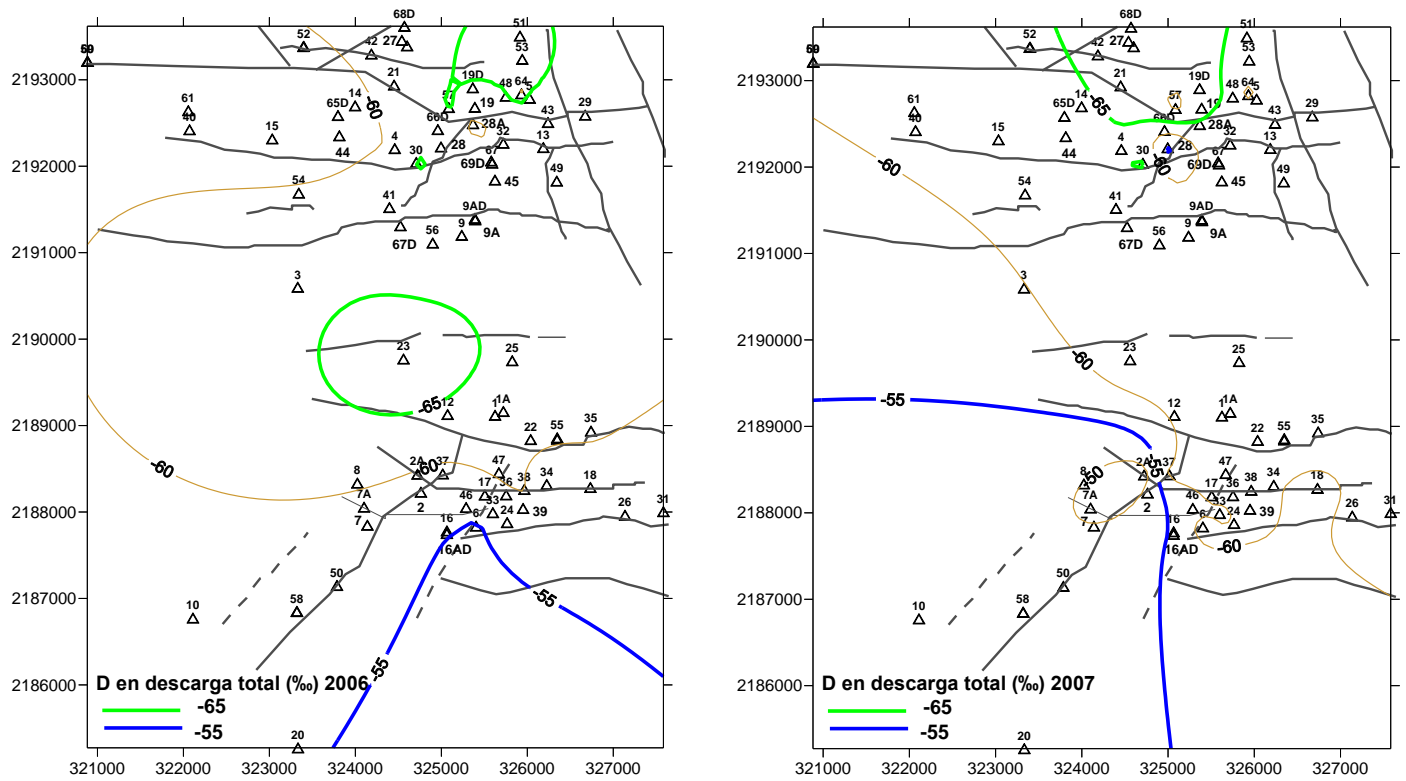


Fig. 8. Distribución de δD en la descarga total para 2006 (izquierda) y 2007 (derecha)

Con base en su enriquecimiento isotópico y con ayuda de las correlaciones δD vs $\delta^{18}O$ halladas se puede inferir que los pozos de la zona sur que produjeron una mayor proporción de fluido de reinyección en sus descargas en el año 2006 (Figura 9, izquierda) fueron los siguientes: AZ-16, AZ-16AD, AZ-46, AZ-33 y AZ-6, y en una proporción menor los pozos productores de vapor AZ-36, AZ-37, AZ-17 y AZ-35, aunque en estos los retornos de reinyección alcanzan sus zonas productoras en fase vapor.

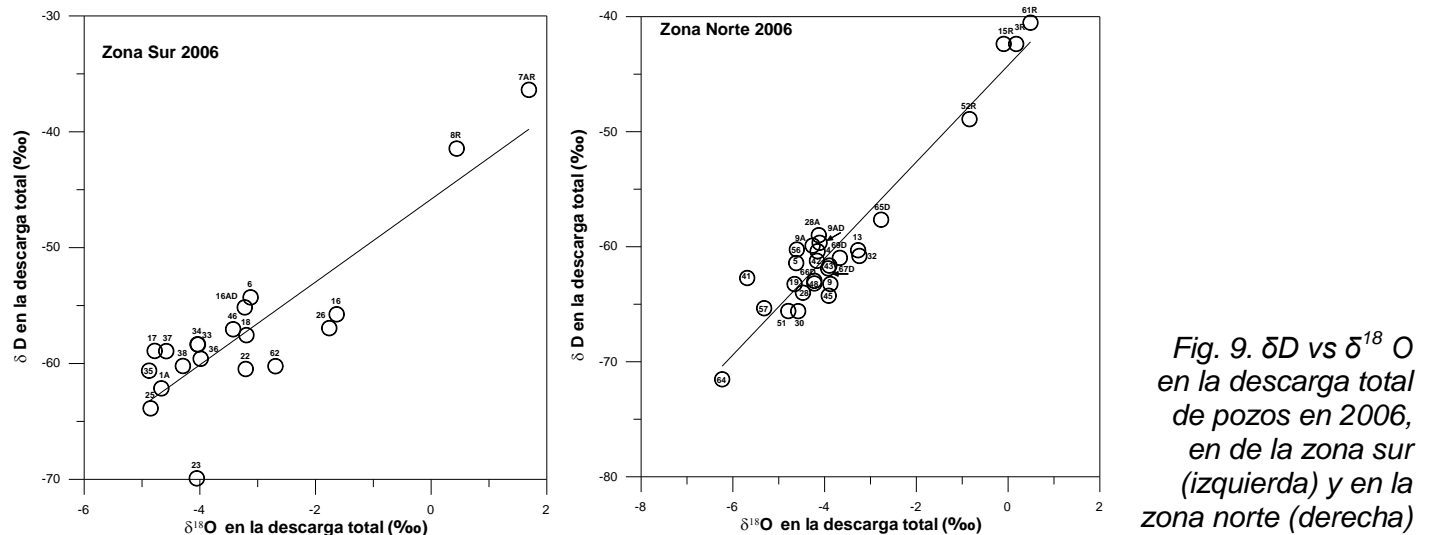
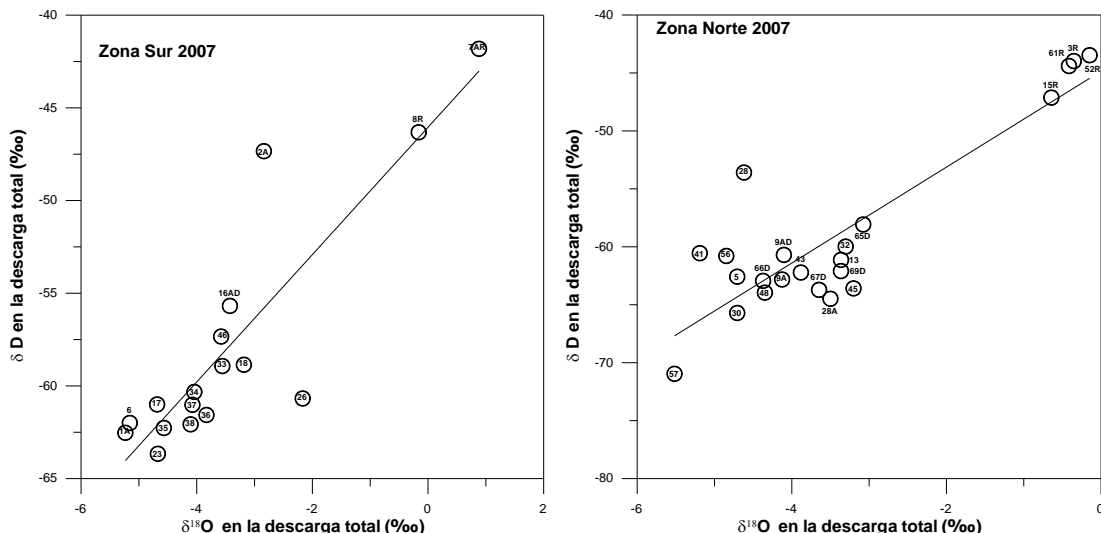


Fig. 9. δD vs $\delta^{18}O$ en la descarga total de pozos en 2006, en de la zona sur (izquierda) y en la zona norte (derecha)

Es posible que al pozo AZ-1A también llegaran retornos de reinyección en fase vapor, en una mínima proporción. En el mismo año 2006 los pozos de la zona norte que produjeron una proporción relativamente

mayor de fluidos provenientes de la reinyección (Fig. 9, derecha) fueron: AZ-65D, AZ-13, AZ-32, AZ-9 A, AZ-9AD, AZ-28 A, AZ-69D y AZ-44, mientras que los pozos AZ-5, AZ-28 y AZ-19, entre otros, produjeron proporciones relativamente menores. Las descargas de los pozos AZ-30, AZ-41, AZ-51 y AZ-57 presentaron una composición relativamente ligera, lo que indica que pueden haber producido una mínima proporción de retornos de reinyección. El fluido de pozo AZ-64 es el que presentó la composición más ligera, lo que puede deberse a que se llevó a cabo una estimulación ácida en él; este pozo produce de otra zona del yacimiento.

Fig. 10. δD vs $\delta^{18}O$ en la descarga total de pozos en 2007, en la zona sur (izquierda) y en la zona norte (derecha)



Para el año 2007 los pozos de la zona sur (Figura 10, izquierda) que produjeron una proporción relativamente alta de retornos de reinyección fueron los siguientes: AZ-2A, AZ-16AD, AZ-46 y AZ-33; los pozos AZ-34, AZ-36 y AZ-37 produjeron una proporción menor, y los pozos AZ-1A, AZ-6, AZ-17, AZ-23 y AZ-38 produjeron las proporciones mínimas. Para la zona norte (Figura 10, derecha) los pozos AZ-65D, AZ-32, AZ-13 y AZ-69D son los que deben haber producido una mayor proporción de fluido proveniente de la reinyección en ese año de 2007. En los pozos AZ-9AD, AZ-43, AZ-67D, AZ-9A y AZ-9AD se nota una proporción menor, mientras que en los pozos AZ-5, AZ-28, AZ-41 y AZ-56 se infirió que los retornos de reinyección alcanzan sus zonas productoras principalmente en fase vapor.

Conclusiones

El estudio de los cambios en la composición química e isotópica de los fluidos producidos en el campo de Los Azufres durante los años 2006 y 2007 refleja la influencia de la reinyección. Los resultados de este estudio indican distribuciones homogéneas de los parámetros geoquímicos que trazan el movimiento de los fluidos inyectores, a pesar de que ni las tasas de reinyección en los pozos inyectores ni la composición de los fluidos inyectados son constantes. Es importante notar que en algunos pozos los retornos de reinyección llegan a los pozos productores en fase vapor. Estos casos se reconocen por un aumento en el contenido de δD en el fluido producido, dado que este isótopo se particiona ligeramente en el vapor a temperaturas por encima de 220° C.

Referencias

Arellano, V.M., R.M. Barragán y R. Lozada, 2002. Análisis de datos químicos y de producción del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. Informe del IIE para la Comisión Federal de Electricidad, Cuernavaca, Mor., México. Inédito, 35 p.

- Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, F. Sandoval and 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.
- Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, 2005. Thermodynamic evolution (1982-2002) of the Los Azufres (Mexico) geothermal reservoir fluids. *Geothermics*, Vol. 34, Núm. 5, pp. 592-616.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, R. González, J. Hernández, and J. Martínez, 2003. Chemical and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, δD) behavior of the Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to exploitation. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 27, pp. 281-285.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, 2005(a). Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, δD) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, Vol. 34, Núm. 4, pp. 527-547.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, N. Segovia, 2005(b). Gas geochemistry for the Los Azufres (Michoacán) geothermal reservoir, México. *Annals of Geophysics*, Vol. 48, pp. 145-157.
- D'Amore, F., and A.H. Truesdell, 1995. Correlation between liquid saturation and physical phenomena in vapor-dominated geothermal reservoirs. *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, pp. 1927-1932.
- Gutiérrez Puente, H., and M.C. Suárez Arriaga, 1992. Los Azufres geothermal field: An updated description from a production/injection point of view. *Geothermal Resources Council Bulletin*, Vol. 21, No. 9, pp. 301-310.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., and J.L. Quijano-León, 2005. Results of geothermal exploitation in Mexico in 2004. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 29, pp. 229-233.
- Iglesias, E., M. Flores, J.L. Quijano, M.A. Torres, and R.J. Torres, 2006. Gas- and liquid-phase tracer testing at the Los Azufres, Mexico, geothermal field: Current status. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 30, pp. 803-808.
- Nieva, D., and 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, pp. 243-258.
- Nieva, D., M. Verma, E. Santoyo, R.M. Barragán, E. Portugal, J. Ortiz, and L. Quijano, 1987. Chemical and isotopic evidence of steam upflow and partial condensation in Los Azufres reservoir. *Proceedings 12th. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, pp. 253-259.
- Torres-Rodríguez, M.A., and M. Flores-Armenta, 1998. Pressure and enthalpy evolution in wells of the Los Azufres geothermal field. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 22, pp. 339-358.
- Torres-Rodríguez, M.A., and M. Flores-Armenta, 2000. Reservoir behavior of the Los Azufres geothermal field, after 16 years of exploitation. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 2269-2275.