

## Variación isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta\text{D}$ ) de fluidos del campo geotérmico de Los Azufres (1987-2010): Identificación de procesos de yacimiento

Rosa María Barragán R.<sup>1</sup>, Víctor Manuel Arellano G.<sup>1</sup>, Alfonso Aragón A.<sup>1</sup>, Juan Ignacio Martínez E.<sup>1</sup>, Alfredo Mendoza C.<sup>2</sup>, Lisette Reyes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113, Col. Palmira, 62490 Cuernavaca, Morelos. Correo: [rmb@ie.org.mx](mailto:rmb@ie.org.mx). <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Residencia Los Azufres, Campamento Agua Fría, Los Azufres, Michoacán.

### Resumen

Las composiciones isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ ) de los fluidos del campo geotérmico de Los Azufres halladas en 2010 se compararon con los valores isotópicos de referencia obtenidos en 1987, para inferir los principales procesos de yacimiento inducidos por la extracción y la reinyección de fluidos. En 2010 en general los fluidos son más ligeros en  $\delta^{18}\text{O}$  con respecto a los valores de referencia (1987), mientras que el  $\delta\text{D}$  se ha enriquecido en pozos donde el fenómeno convectivo es importante (AZ-17, 22, 5, 26, 46, 18 y 38) y se ha agotado en los pozos que han sufrido alguna dilución por mezcla (AZ-9, 19 y 28). Esto se debe a que en procesos de separación de fases a temperaturas mayores de 220°C el  $\delta\text{D}$  tiende a particionarse en el vapor. La variación isotópica del pozo AZ-6 muestra que actualmente en ese estrato somero del yacimiento el líquido alimentador consiste de una mayor proporción de condensado de vapor, procedente del reflujo que implica el proceso convectivo. Por otro lado, se encontró que actualmente los fluidos isotópicamente más ligeros hallados en el campo corresponden a los pozos AZ-30 y 51, localizados en la zona norte, así como en pozos localizados a lo largo de la llamada Falla Dorada. En los pozos AZ-9, 19 y 28 el análisis de las variaciones isotópicas evidencia un fenómeno de dilución en el tiempo, con una tendencia que señala al fluido del pozo AZ-51 como el componente más ligero. Esto apoyaría la hipótesis del modelo geoquímico conceptual, que establece la presencia de dos fluidos de composiciones isotópicas ligeramente diferentes en la zona norte del campo, en virtud de la pendiente positiva obtenida de la correlación  $\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$ . En el modelo conceptual no se contó con datos isotópicos de los pozos isotópicamente más ligeros AZ-30 y 51 ya que empezaron a producir posteriormente a 1987. Los resultados del presente estudio también muestran que en algunos pozos (AZ-13 y 32) se notan efectos combinados tanto de procesos de mezcla como de convección. Con base en las variaciones isotópicas obtenidas en el presente estudio, se establece que la composición isotópica de pozos muy afectados por la reinyección (AZ-2A, 16AD) dependerá de la composición de los fluidos de reinyección, de los gastos reinyectados y de la fase, líquida o vapor, en que el retorno de la reinyección llega al pozo productor.

**Palabras clave:** Los Azufres, fluidos geotérmicos, fenómenos de yacimiento, procesos de mezcla y convección

### Abstract

The isotopic compositions ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ ) of fluids from Los Azufres wells as found in 2010 were related to the corresponding values obtained in 1987 and reported as “reference” for the reservoir fluids in order to identify the main processes induced by fluid extraction and reinjection. According to 2010 results, most of produced fluids have become  $\delta^{18}\text{O}$  depleted regarding reference values while  $\delta\text{D}$  behavior depends on the dominant process taking place as follows. Enriched  $\delta\text{D}$  values were observed in wells where convection is important at reservoir (AZ-17, 22, 5, 26, 46, 18 and 38) while depleted  $\delta\text{D}$

values were seen in wells where some dilution has occurred (AZ-9, 19 and 28). This is due to the fact that for a phase separation process above 220°C, δD slightly partitions into steam. The isotopic variation of well AZ-6 (a shallow steam well) shows that presently this well produces from a reservoir layer with a higher proportion of condensed steam which flows down because of convection, regarding production in the past (1987). In addition, it was found that at present time, the more isotopically-depleted fluids were those produced by wells AZ-30 and AZ-51 located in the north zone and also in other wells located near or along the Dorada Fault. The isotopic variations of wells AZ-9, 19 and 28 show a dilution process progressing in time, with a trend towards the well AZ-51, which constitutes the isotopically lighter component. These results strongly support the hypothesis given in the geochemical model of the Los Azufres reservoir which establishes the presence of two fluids with slightly different isotopic composition in the north zone. Such hypothesis was based on the δD vs δ<sup>18</sup>O behavior of fluids for this zone, which provided a positive slope in contrast with results found for the south zone wells where such relationship was negative. The isotopically-depleted wells AZ-30 and AZ-51 started production after 1987 and then they were not considered in the geochemical model. Results of this study show that in wells AZ-13 and AZ-32 combined mixing and convection processes occur. Also, it is concluded that the isotopic compositions of wells affected by reinjection (such as AZ-2A, AZ-16 and AZ-16AD) depend on the composition of reinjection fluids, rates of reinjection and the phase (liquid or steam) in which reinjection returns reach the production zones of wells.

## 1. Introducción

El yacimiento geotérmico de Los Azufres, Michoacán, donde hay actualmente una capacidad instalada de 188 MW, se ha estudiado de manera sistemática empleando técnicas multidisciplinarias desde su etapa temprana de explotación, con el propósito de investigar su respuesta a la extracción y a la reinyección de fluidos y así prestar apoyo en la etapa de explotación tendiente a prolongar la vida útil de este recurso energético (Arellano et al., 2005; Barragán et al., 2005). Estas técnicas incluyen el análisis tanto de la información química de fluidos producidos (agua y vapor) como de datos de producción de pozos y de gastos de reinyección. Una de las herramientas que se han utilizado de manera exitosa es el monitoreo isotópico (δ<sup>18</sup>O, δD) de los fluidos producidos, el cual ayuda a dilucidar fenómenos de yacimiento tales como mezcla de fluidos, ebullición, etc. (Barragán et al., 2008; 2010).

En este trabajo se comparó el comportamiento isotópico de los fluidos encontrado en 2010 con respecto a los valores isotópicos “de referencia” dados en el modelo geoquímico preliminar del yacimiento (Nieva et al., 1987) para identificar los procesos dominantes ocurridos como respuesta a la explotación. En la Figura 1 se muestra la localización esquemática de pozos en el campo (todas las figuras al final del texto).

## 2. Síntesis del modelo geoquímico del yacimiento de Los Azufres

El modelo geoquímico del yacimiento de Los Azufres propuesto por Nieva y colaboradores (1987) está basado en las distribuciones espaciales de las composiciones químicas e isotópicas de los fluidos a las condiciones del yacimiento. Para obtener la composición química e isotópica de los fluidos de yacimiento, se estimó el “exceso de vapor” presente en la mezcla alimentadora de los pozos, mediante equilibrio gaseoso, conociendo la temperatura de yacimiento. Este parámetro se utilizó para “corregir” las composiciones químicas e isotópicas de las descargas totales de los pozos obteniéndose así la composición del líquido del yacimiento. Los resultados mostraron que las especies volátiles (CO<sub>2</sub>) se

concentraban en los estratos someros (Figura 2) mientras que las especies no volátiles (cloruros y oxígeno-18) se concentraban en estratos profundos (Figuras 3 y 4).

Esas distribuciones de especies halladas en una etapa temprana de explotación del yacimiento se explicaron por la ocurrencia de un proceso de transporte de calor por convección que implica el ascenso y condensación parcial de vapor con reflujo de condensado en su estado natural. En la separación de fases el vapor que se separa y asciende es rico en componentes volátiles mientras que el líquido residual se enriquece en no volátiles. Este proceso se identifica mediante la pendiente que se obtiene de la relación  $\delta D$  vs  $\delta^{18} O$ . Si el proceso de separación de vapor ocurre a temperaturas superiores a 220°C, el deuterio tiende a comportarse como especie volátil (Truesdell et al., 1977) por lo que el vapor que se separa estará agotado en oxígeno-18 y enriquecido en deuterio resultando esto en una pendiente negativa para la relación  $\delta D$  vs  $\delta^{18} O$ .

Para los pozos de la zona sur la pendiente de la relación  $\delta D$  vs  $\delta^{18} O$  resultó negativa (Figura 5) definiendo la ocurrencia del proceso convectivo. En cambio en la zona norte se encontró una pendiente positiva para la citada relación isotópica (Figura 6), la cual indica un proceso de mezcla entre dos fases líquidas de composiciones isotópicas ligeramente diferentes. Al mismo tiempo se encontró que las composiciones isotópicas de los pozos AZ-5 y AZ-19 de la zona norte, aparte de respetar la relación de mezcla también se ajustaron a la tendencia del proceso convectivo propio de los pozos de la zona sur. Las composiciones químicas e isotópicas de los fluidos dadas en el modelo conceptual han constituido una referencia útil para investigar procesos debidos a la explotación.

### **3. Comportamiento isotópico ( $\delta D$ vs $\delta^{18} O$ ) observado en 2010**

Las composiciones isotópicas de los fluidos producidos e injectados en el campo geotérmico de Los Azufres obtenidas en agosto de 2010 se muestran en la Figura 7 (A y B) para cada zona del campo. Como se observa en esta figura, en ambas zonas se obtienen correlaciones de pendientes positivas que indican mezcla de fluidos del yacimiento con fluidos de reinyección. Estos últimos presentan una composición isotópica muy enriquecida debido a procesos de evaporación, lo que también eleva su salinidad.

En la Figura 7 (B) es evidente que los pozos AZ-2A y AZ-16 (productores de mezcla), producen retornos de reinyección en una proporción muy alta, mientras que los pozos AZ-16AD y AZ-46 (productores de vapor) también producen retornos de reinyección aunque en una proporción menor. En la Figura 7 (A) se observa que, con respecto a la zona sur, la reinyección tiene efectos menores en la zona norte, donde además se encuentran los fluidos más agotados isotópicamente, en el pozo AZ-51.

### **4. Comportamiento entalpía-cloruros observado en 2010**

En la Figura 8 se muestran los datos entalpía-cloruros de los pozos de mezcla, según datos de 2010. La línea sólida representa el fenómeno de ebullición y pérdida de vapor, que se obtuvo con datos pre-explotación (Arellano et al, 2005). También se nota en la figura el aumento de cloruros en los pozos AZ-2A y AZ-16 con respecto a la línea de ajuste, lo que confirma que los pozos producen una alta proporción de retornos de reinyección. Este mismo comportamiento se observa en los pozos localizados encima de la recta de ebullición, aunque el efecto de la reinyección es mucho más limitado en casi todos.

Las desviaciones de los datos hacia la izquierda de la recta de ajuste que se observan en algunos pozos, como el AZ-51, aunque pequeñas, indican cierta dilución. En general parece que la línea de ebullición hallada en el estado inicial sigue siendo una referencia útil para estudiar la evolución de los fluidos. Algunos de los pozos usados para obtener la línea de ebullición se han convertido en pozos de vapor (AZ-5, AZ-13) por lo que actualmente no se cuenta más con datos de cloruros para esos pozos.

## 5. Variaciones isotópicas con respecto a valores de referencia

Con el propósito de estimar la evolución isotópica de los fluidos de Los Azufres con respecto al estado inicial, en la Figura 9 se graficaron las composiciones isotópicas obtenidas en 2010 junto con los valores de referencia (Nieve et al., 1987). Como ejemplo se tomaron los datos del muestreo de agosto de 2010. Como se observa en la figura, en general la composición isotópica actual de los fluidos con respecto a los valores de referencia se ha hecho más ligera en cuanto a  $\delta^{18}\text{O}$  pero el  $\delta\text{D}$  se ha enriquecido en los pozos donde el fenómeno convectivo es importante (como en los pozos AZ-17, AZ-22, AZ-5, AZ-26, AZ-46, AZ-18 y AZ-38) y se ha agotado en pozos que han sufrido alguna dilución por mezcla (pozos AZ-9, AZ-19 y AZ-28).

La composición isotópica del pozo AZ-6 hallada en 2010 muestra valores más agotados que los de referencia, lo que probablemente se debe a que el líquido en el yacimiento contiene actualmente una mayor proporción de condensado de vapor procedente del reflujo que implica el proceso convectivo. Es interesante notar que la continuación de la línea de dilución del pozo AZ-9 tiende a interceptar la composición isotópica del fluido más ligero hallado en el campo, el del pozo AZ-51, que además es el extremo de la línea de ajuste de la zona norte. Esto apoya la hipótesis de que el fluido del pozo AZ-51 podría ser representativo del fluido más ligero presente en la zona norte.

Las líneas de dilución de los pozos AZ-19 y AZ-28 también se relacionan con la composición del fluido del pozo AZ-51 ya que los extremos correspondientes a 2010 caen muy cerca de la línea de ajuste de la mezcla hallada en la zona norte. Es posible que a medida que disminuye la presión del yacimiento en la zona norte debido a la explotación, este fluido más ligero esté reemplazando al fluido original, como se nota en la distribución de isolíneas de deuterio en la Figura 10. En esta distribución los valores más enriquecidos de  $\delta\text{D}$  (-60 ‰) en la zona norte se observan en el oeste, coincidiendo con la ubicación de los pozos de reinyección, con una tendencia de decrecimiento (a -66 ‰) hacia el noreste.

La distribución de valores de agosto de 2010 muestra una inflexión de la isolínea de -64 ‰ hacia la parte central de la zona (pozos AZ-28, AZ-30, AZ-19, AZ-69D) y valores muy ligeros (< -66 ‰) en el pozo AZ-51. El comportamiento que muestran los pozos AZ-13 y AZ-32 en la Figura 9 indica efectos combinados de mezcla y convección. Por esta causa la pendiente de las líneas se pierde. En la Figura 9 es obvio que la composición isotópica de pozos muy afectados por la reinyección dependerá de la composición de los fluidos de reinyección, de los gastos reinyectados y de si los retornos llegan al pozo productor en fase líquida o en fase vapor.

## 6. Conclusiones

Las relaciones  $\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  halladas en 2010 indicaron fenómenos de mezcla entre fluidos del yacimiento y los fluidos de reinyección que presentan una composición isotópica más enriquecida debido a procesos de evaporación. Estos resultados permitieron identificar el avance de fluidos más ligeros isotópicamente en la parte central de la zona norte, posiblemente como respuesta a la

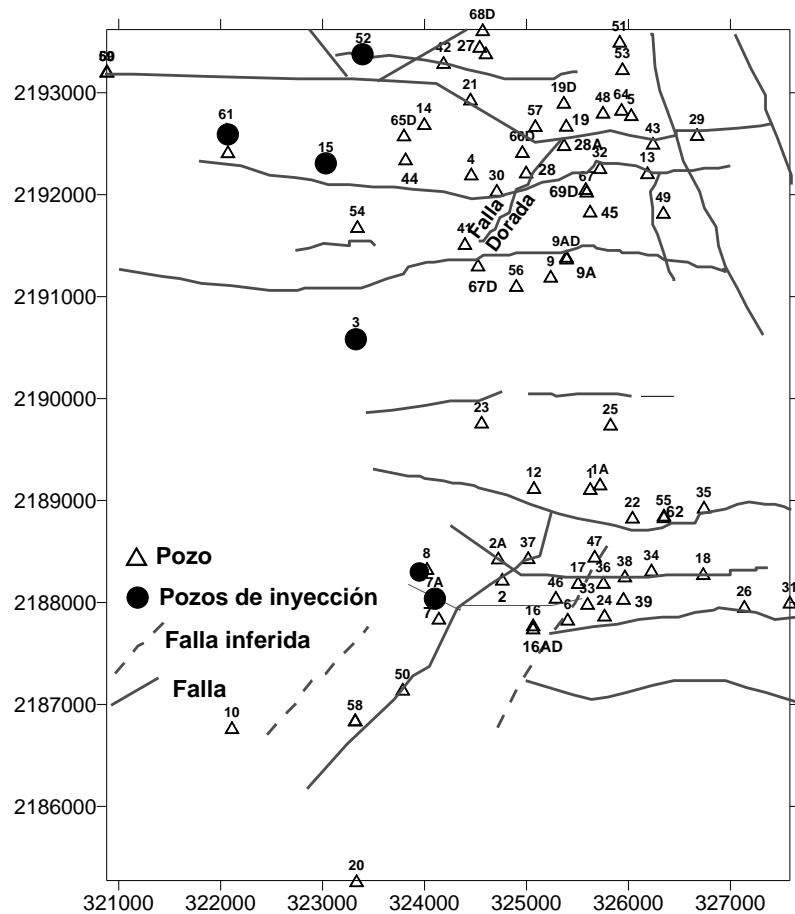
disminución de presión por la explotación. Al parecer, estos fluidos estarían tipificados por las características de los del pozo AZ-51, que normalmente constituye el extremo ligero de las líneas de mezcla entre los fluidos del yacimiento y los de reinyección.

Se investigó la evolución de los fluidos comparando las composiciones isotópicas actuales contra los valores de referencia. Los resultados indican que en general los fluidos se han agotado en  $\delta^{18}\text{O}$  con el tiempo mientras que el  $\delta\text{D}$  se ha enriquecido en pozos donde el fenómeno de convección es dominante o se ha agotado cuando los procesos de mezcla (dilución) son dominantes. En los pozos en los que la reinyección tiene un efecto importante, ambos isótopos se incrementan con el tiempo, como en los pozos AZ-16 y AZ-2A. Estos resultados soportan la hipótesis del modelo geoquímico sobre la presencia de dos fases líquidas de composiciones isotópicas ligeramente diferentes en la zona norte del campo.

## Referencias

- Arellano, V.M., M.A. Torres, and R.M. Barragán, 2005. Thermodynamic evolution of the Los Azufres (Mexico) geothermal reservoir from 1982 to 2002. *Geothermics*, 34, (5), 592-616.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal and F. Sandoval, 2005. Isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, 34, (4), 527-547.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, J.I. Martínez, A. Aragón, L. Reyes y R. González, 2009. Patrones de comportamiento de especies químicas e isotópicas (2006-2007) en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., en respuesta a la reinyección. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 22 (2), 19-27.
- Barragán R.M., V.M. Arellano, A. Aragón, J.I. Martínez, A. Mendoza and L. Reyes, 2010. Geochemical data analysis (2009) of Los Azufres geothermal fluids (Mexico). In *Water Rock Interaction*, Birkle and Torres-Alvarado (Eds.), 2010. Taylor & Francis Group, London, pp. 137- 140.
- Nieva D., M. Verma, E. Santoyo, R.M. Barragán and E. Portugal, 1987. Chemical and isotopic evidence of steam upflow and partial condensation in Los Azufres reservoir. *Proc. Twelfth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, pp. 253-260.
- Truesdell, A. H., M. Natheson, And R.O. Rye, 1977. The effects of subsurface boiling and dilution on the isotopic compositions of Yellowstone thermal waters. *Journal of Geophysical Research*, 82 (26), 3694-3704.

**(Figuras 1 a 10 en páginas siguientes)**



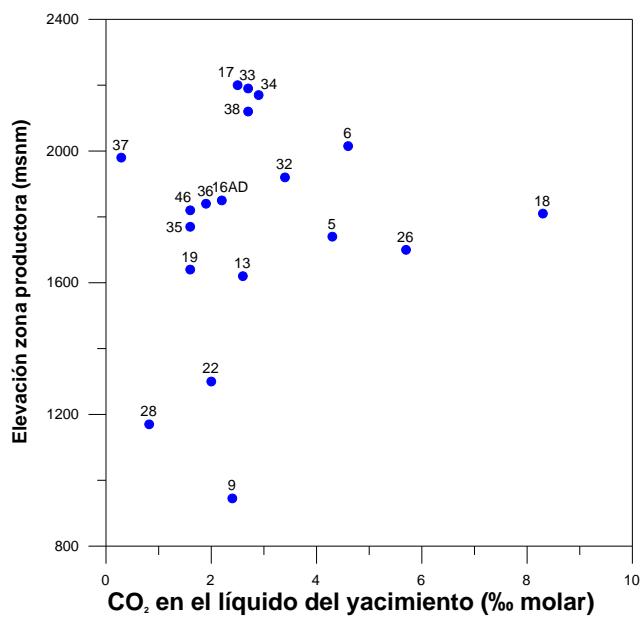


Figura 2. Concentración de CO<sub>2</sub> en la fase líquida del yacimiento según datos de referencia dados en el modelo geoquímico conceptual vs elevación de las zonas productoras de los pozos (Nieva *et al.*, 1987).

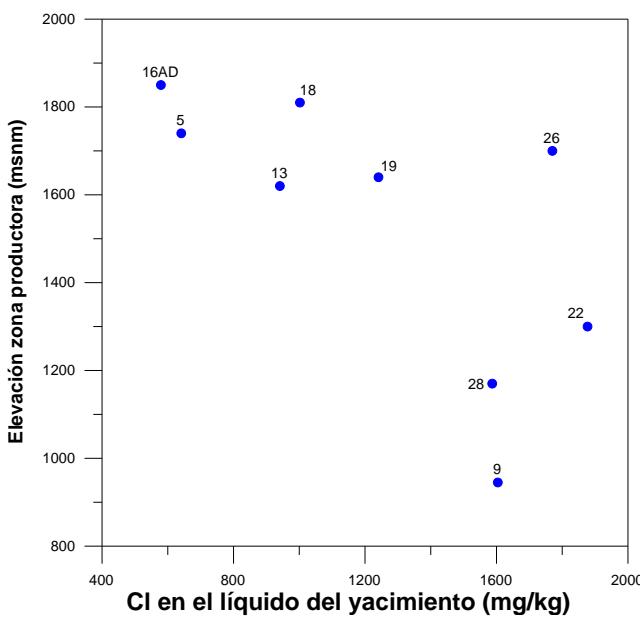


Figura 3. Concentración de Cl en la fase líquida del yacimiento según datos de referencia dados en el modelo geoquímico conceptual vs elevación de las zonas productoras de los pozos (Nieva *et al.*, 1987).

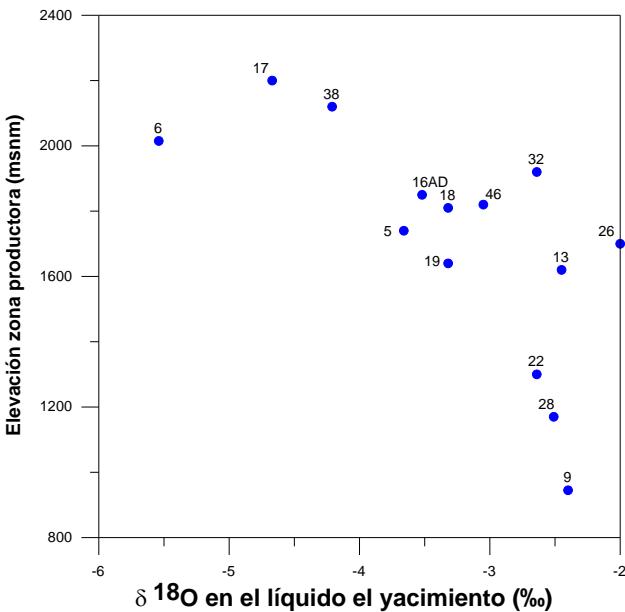


Figura 4. Oxígeno-18 en la fase líquida del yacimiento según datos de referencia dados en el modelo geoquímico conceptual vs elevación de las zonas productoras de los pozos (Nieva *et al.*, 1987).

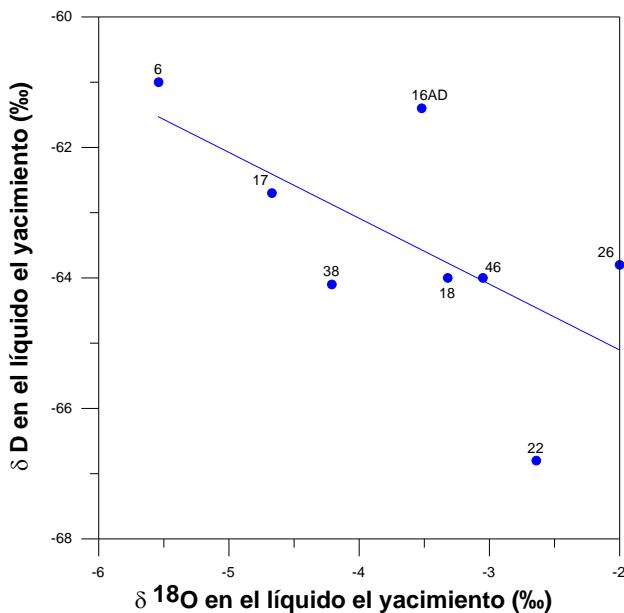


Figura 5. Oxígeno-18 vs deuterio en la fase líquida del yacimiento de pozos de la zona sur, según datos de referencia dados en el modelo geoquímico conceptual (Nieva *et al.*, 1987).

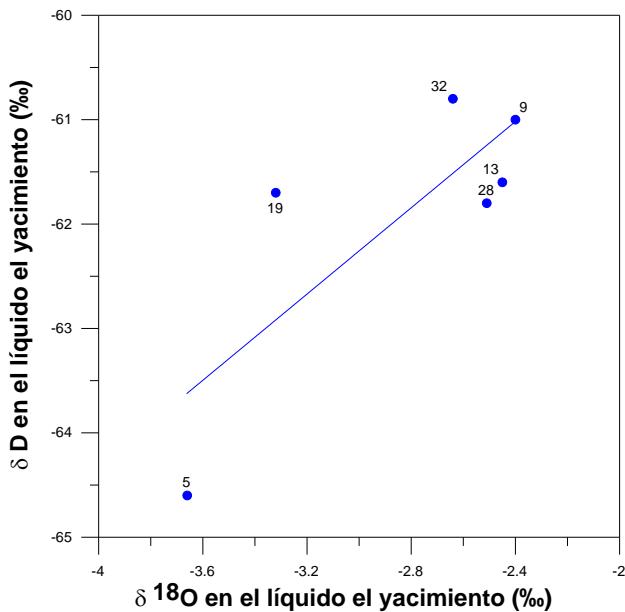


Figura 6. Oxígeno-18 vs deuterio en la fase líquida del yacimiento de pozos de la zona norte, según datos de referencia dados en el modelo geoquímico conceptual (Nieva et al., 1987).

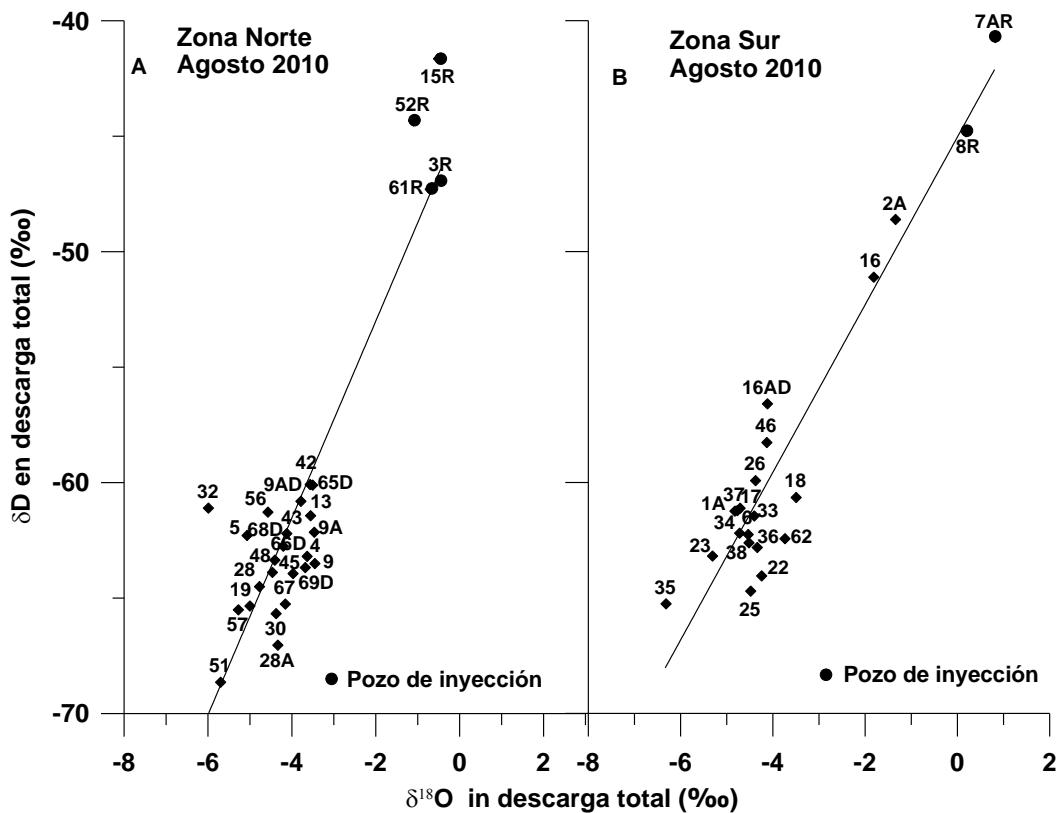


Figura 7. δD vs δ¹⁸O de fluidos de pozos del campo geotérmico de Los Azufres según datos de 2010.

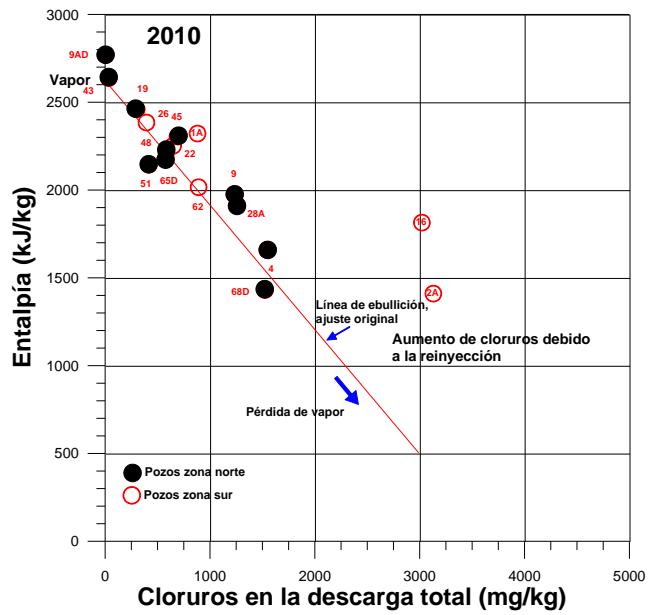


Figura 8. Comportamiento entalpía vs cloruros de pozos de mezcla según datos de 2010.

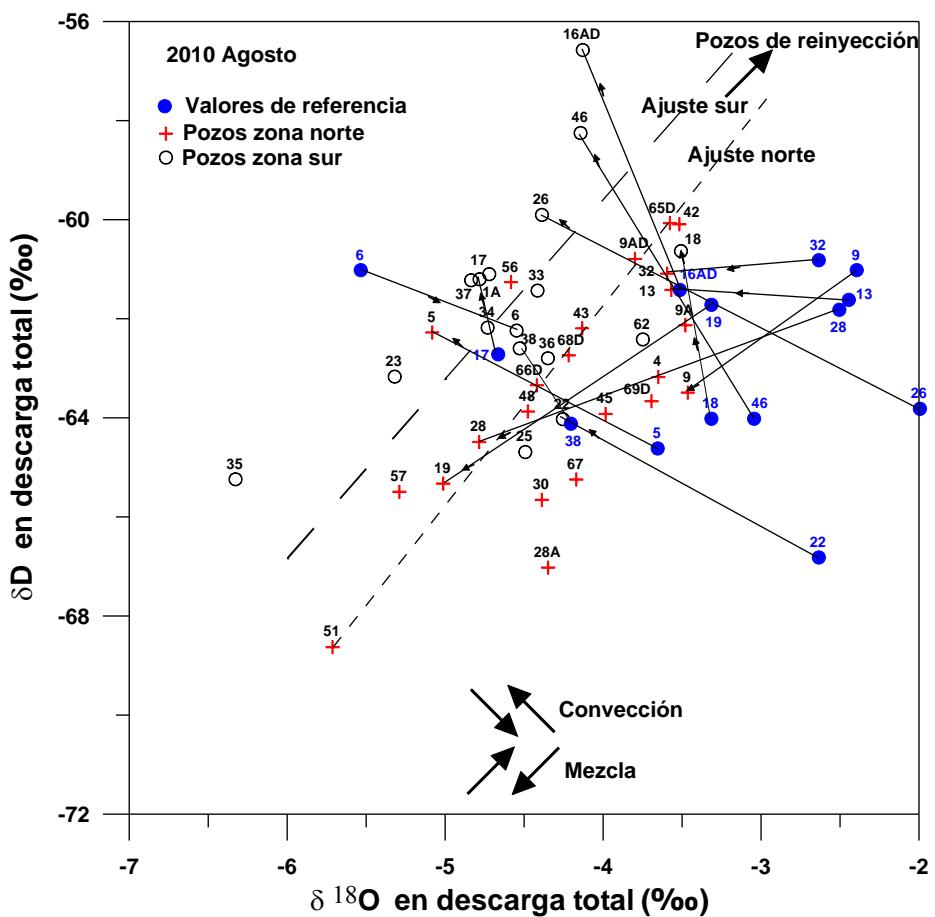


Figura 9. Composición isotópica de agosto de 2010 de fluidos de pozos de Los Azufres y valores de referencia.

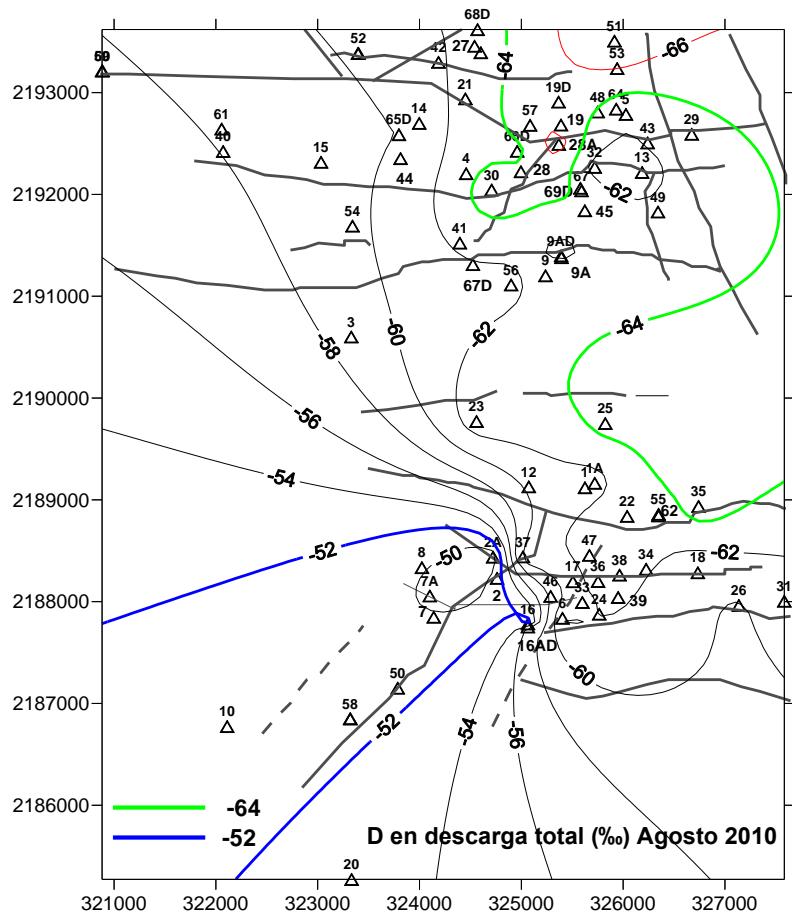


Figura 10. Distribución de valores de  $\delta D$  en la descarga total de pozos productores según datos de agosto de 2010.