

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, Lisette Reyes D.² y Rubí González²

¹*Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor., correo: rmb@iie.org.mx.* ²*Comisión Federal de Electricidad, Residencia Los Azufres, Campamento Agua Fría, Los Azufres, Mich.*

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 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: Los Azufres, geoquímica, isotopía, inyección.

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

Abstract

Chemical and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) data from the Los Azufres geothermal field fluids for 2006 and 2007 were analyzed in order to investigate the changes occurred in their behavior patterns that could be

related to reinjection into the reservoir. Data process included the calculation of the total discharge chlorides, the reservoir temperatures, the excess steam in feeding fluids to the wells, the CO₂ concentrations at total discharges and at the reservoir liquid phase and the liquid saturations into formation. Contour lines were obtained for annual average parameters in 2006 and 2007 in order to define their evolution regarding similar maps for 2005 and relate them to the re-injection histories. Fluid isotopic compositions, including those from injection fluids, were correlated to estimate mixing fluids effects in wells. The results suggest that chemical parameters respond to the mass flow rate injected. δD vs $\delta^{18}O$ relationships show that a number of wells produce different proportions of reinjection returns as follows. In the north zone the wells AZ-65D, AZ-13, AZ-32, AZ-9A, AZ-9AD, AZ-28A, AZ-69D and AZ-44 produce a relatively higher proportion while the wells AZ-5, AZ-28 y AZ-19 produce lower proportions. The wells AZ-2A, AZ-16AD, AZ-46 and AZ-33 from the south zone of the field produce higher proportions of reinjection returns compared to the wells AZ-34, AZ-36 and AZ-37. The liquid saturation distribution found for 2007 shows that the maximum saturation areas have decreased compared to those obtained for 2005 and 2006. In 2007 the maximum liquid saturations were found around the wells AZ-22 and AZ-23 (south zone) and AZ-28, AZ-32, AZ-45 and AZ-48 (north zone). Minimum saturations were found around the wells AZ-6 and AZ-16 (south zone) and AZ-56 (north zone). CO₂ for the reservoir liquid was used to trace the paths of reinjection fluids considering that these fluids are depleted in this specie. Thus minimum CO₂ contour lines indicate the movement of the reinjection fluids in the reservoir.

Keywords: Los Azufres, geochemistry, isotopy, injection.

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 el objeto de inferir la ocurrencia de procesos de yacimiento debidos a la explotación, la 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 se ha efectuado prácticamente de manera simultánea a la explotación y ha tenido efectos benéficos al yacimiento (Gutiérrez y Suárez, 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 hallar 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

Se calcularon valores promedio anuales de 2005; 2006 y 2007 de los cloruros en la descarga total y de los geotermómetros Na/K (Nieva y 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 dado por D'Amore y Truesdell, (1995) utilizando las estimaciones de temperatura descritos 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

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran las distribuciones de temperatura de yacimiento según datos promedio de 2005, 2006 y 2007 respectivamente. Los resultados indicaron que la temperatura de yacimiento responde a las tasas reinyectadas en el campo, en 2006 la distribución indicó temperaturas menores que en 2005 y en 2007, teniéndose en 2006 mayores gastos inyectados (Figura 2). Las isolíneas de cloruros de la descarga total de 2005, 2006 y 2007 se muestran en las Figuras 6, 7 y 8 respectivamente. Los cloruros de la descarga total hallados con datos de 2006 también mostraron una mayor concentración en los fluidos producidos con respecto a 2005 y 2007; indicando que en general en 2006 los fluidos producidos contenían una proporción mayor de retornos de reinyección. 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 (Figura 9), 2006 (Figura 10) y 2007 (Figura 11) indicó 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 de 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.

Las distribuciones de saturación de líquido en la formación correspondientes a 2005, 2006 y 2007 se presentan en las Figuras 12, 13 y 14 respectivamente. De acuerdo a la distribución de 2005, se observa que las saturaciones más altas se localizan en una gran área del centro de la zona norte. Asimismo, 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. En 2006 las saturaciones mínimas de la zona sur contienen 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 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 correspondiente a 2006 y a 2007 también reflejó la respuesta del yacimiento a la extracción y reinyección de fluidos; en concordancia con los resultados del análisis de datos químicos. La distribución de la composición de $\delta^{18}\text{O}$ en los fluidos producidos en 2006 (Figura 15) mostró en general valores más enriquecidos en el campo que en 2007 (Figura 16), como resultado de las relativamente altas tasas de reinyección ocurridas en 2006 (Figura 2). Respecto a la distribución de δD de los fluidos producidos, en 2006 (Figura 17) los valores también se notaron más enriquecidos que en 2007 (Figura 18) principalmente en la zona sur del campo. Esto se atribuyó tanto a las altas de reinyección ocurridas en 2006 y 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 a una composición isotópica más ligera de los fluidos reinyectores (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 siendo los componentes de la mezcla por un lado los fluidos del yacimiento con una composición isotópica relativamente más ligera y los fluidos de reinyección con una composición isotópica enriquecida. Con base en su enriquecimiento isotópico y con ayuda de las correlaciones δD vs $\delta^{18}\text{O}$ halladas se puede inferir que los pozos de la zona sur que produjeron una mayor proporción de fluido de reinyección en sus descargas en 2006 (Figura 19) fueron AZ-16, AZ-16AD, AZ-46, AZ-33 y AZ-6 y en una proporción menor los pozos de vapor AZ-36, AZ-37, AZ-17 y AZ-35 aunque en ellos los retornos de reinyección alcanzan sus zonas productoras en fase vapor. Es posible que al pozo AZ-1A también llegaran retornos de reinyección en fase vapor, en una mínima proporción. En 2006 en la zona norte (Figura 20) los pozos que produjeron una relativamente mayor proporción de fluidos provenientes de la reinyección 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 relativamente menores proporciones. Las descargas de los pozos AZ-30, AZ-41, AZ-51 y AZ-57 presentaron una composición relativamente ligera, lo que indicó que pueden haber producido una mínima proporción de retornos de reinyección, mientras que el fluido de pozo AZ-64 es el que presentó la composición más ligera lo que puede deberse a que a partir de se realizó una estimulación ácida, este pozo produce de otra zona del yacimiento. En 2007 los pozos de la zona sur (Figura 21) que produjeron una relativamente alta proporción de retornos de reinyección fueron AZ-2A, AZ-16AD, AZ-46 y AZ-33; una proporción menor los pozos AZ-34, AZ-36 y AZ-37 mientras que los pozos AZ-1A, AZ-6, AZ-17, AZ-23 y AZ-38 producen mínimas proporciones. En la zona norte (Figura 22) los pozos AZ-65D, AZ-32, AZ-13 y AZ-69D son los que deben haber producido una mayor proporción de fluido proveniente de reinyección; 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 composición química e isotópica de los fluidos producidos en el campo de Los Azufres en 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 las tasas de reinyección en los pozos inyectores no son constantes ni la composición de los fluidos de reinyección es constante. 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 and 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, 35 p. Inédito.
- 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 and 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 ($\delta^{18}O$, 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, and F. Sandoval (2005a). Isotopic ($\delta^{18}O$, 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, and N. Segovia (2005b). 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 1995 World Geothermal Congress*, Florencia Italia, pp. 1927-1932.
- Gutiérrez P., H., and M.C. Suárez (1992). Los Azufres geothermal field: An updated description from a production/injection point of view. *Geothermal Resources Council Bulletin*, Sept./Oct., 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., 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.

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.

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, Japón, pp. 2269-2275.

FIGURAS

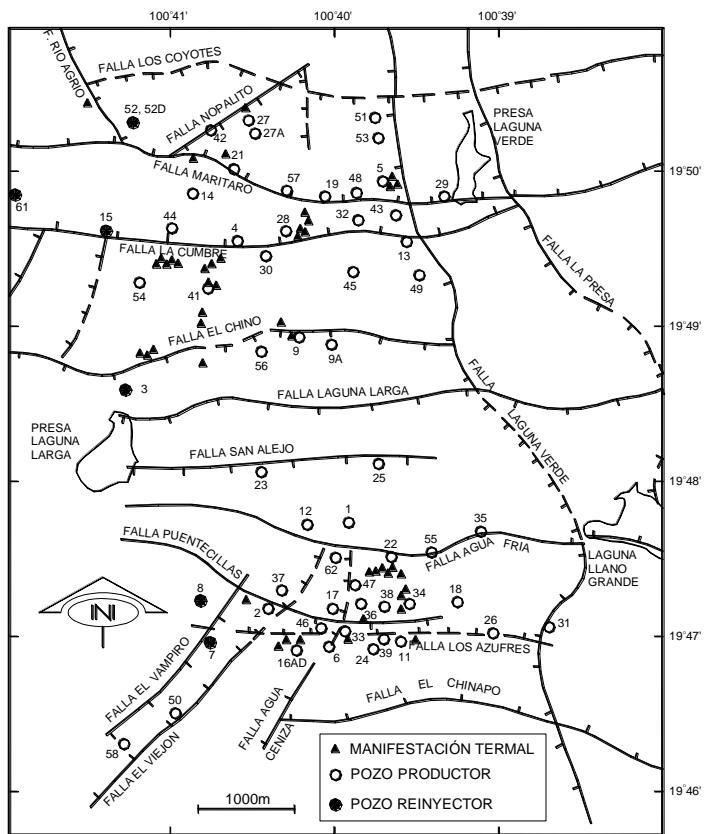


Figura 1. Localización de pozos en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán.

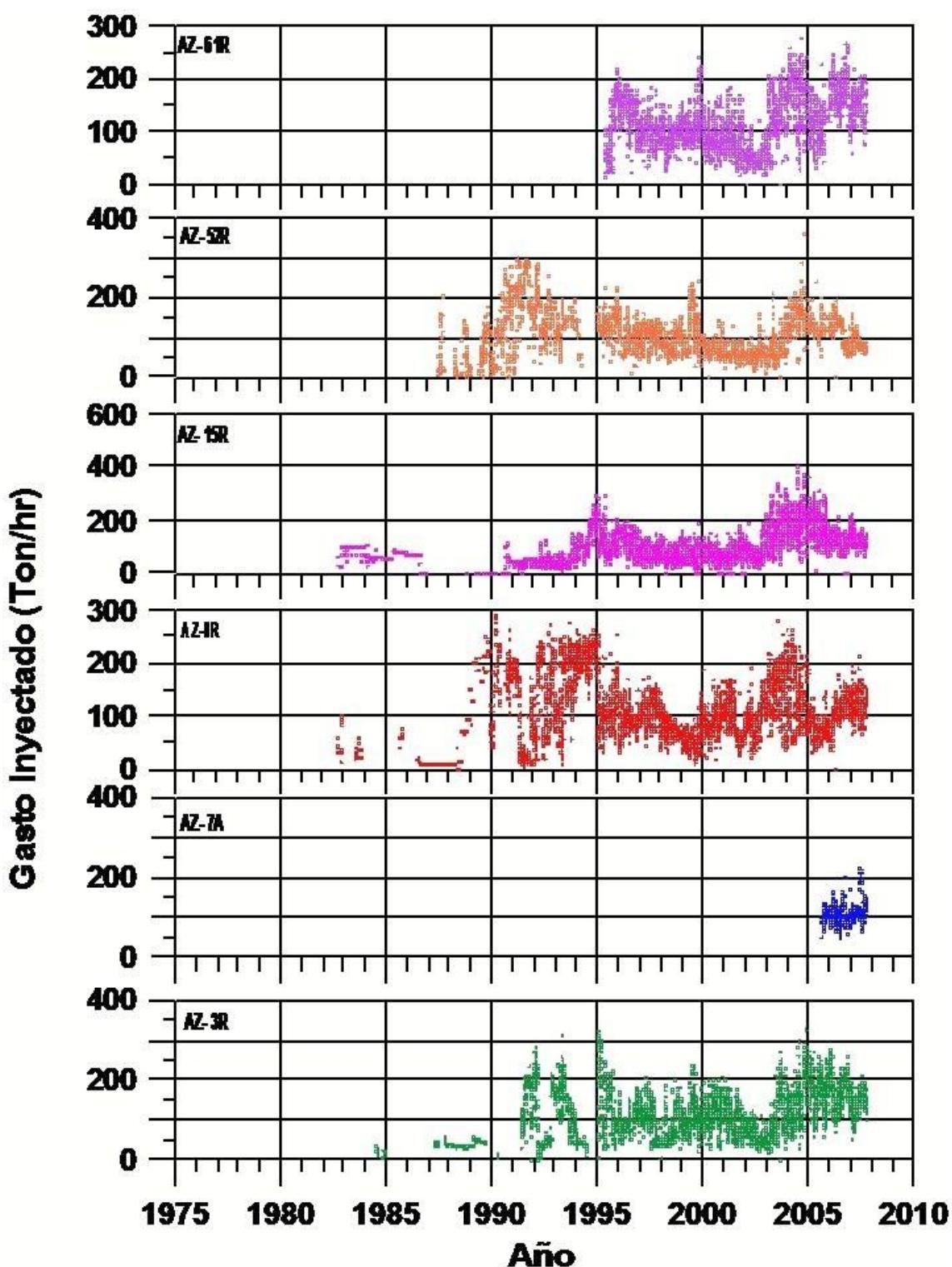


Figura 2. Historiales de gastos re-inyectados al yacimiento.

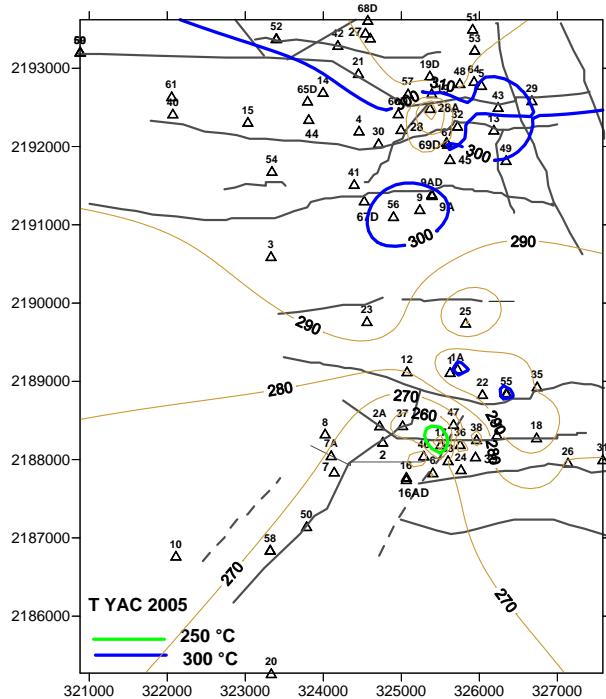


Figura 3. Distribución de temperatura de yacimiento estimada para 2005.

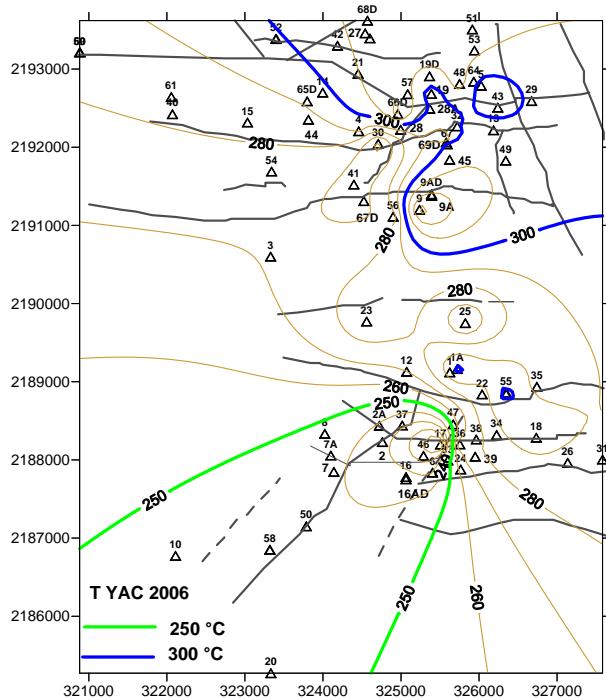


Figura 4. Distribución de temperatura de yacimiento estimada para 2006.

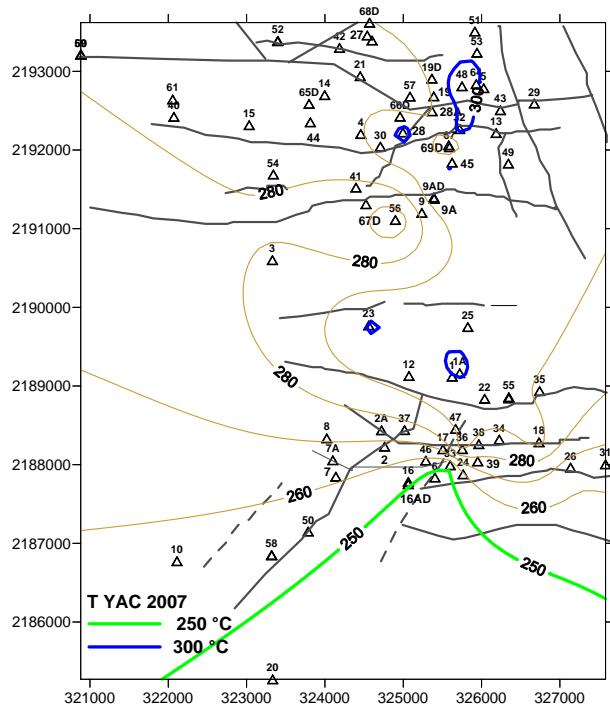


Figura 5. Distribución de temperatura de yacimiento estimada para 2007.

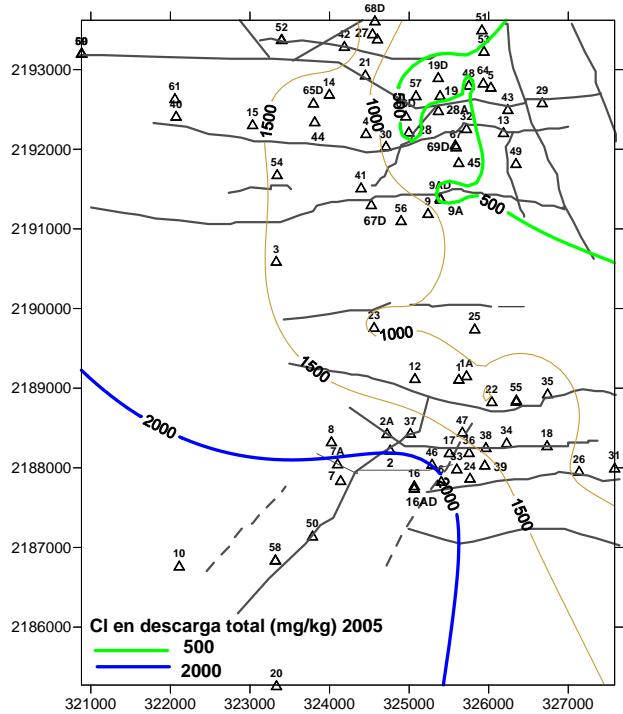


Figura 6. Distribución de cloruros en la descarga total para 2005.

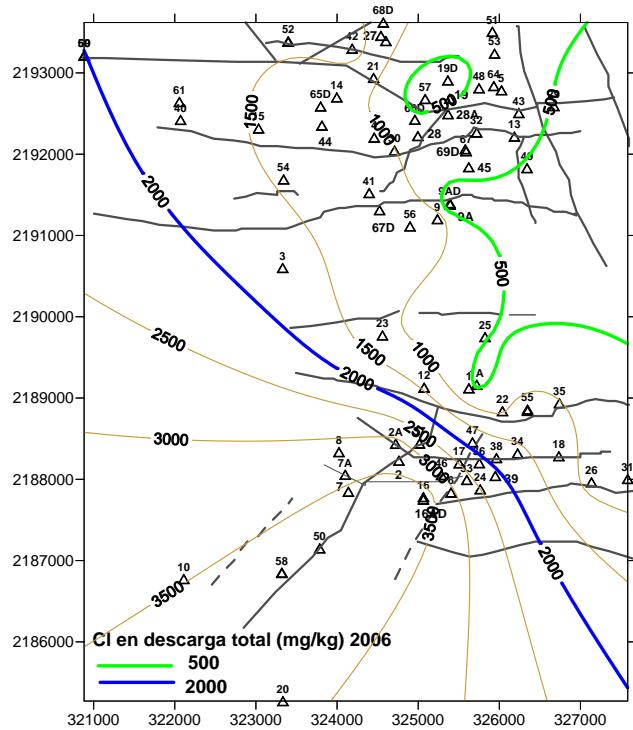


Figura 7. Distribución de cloruros en la descarga total para 2006.

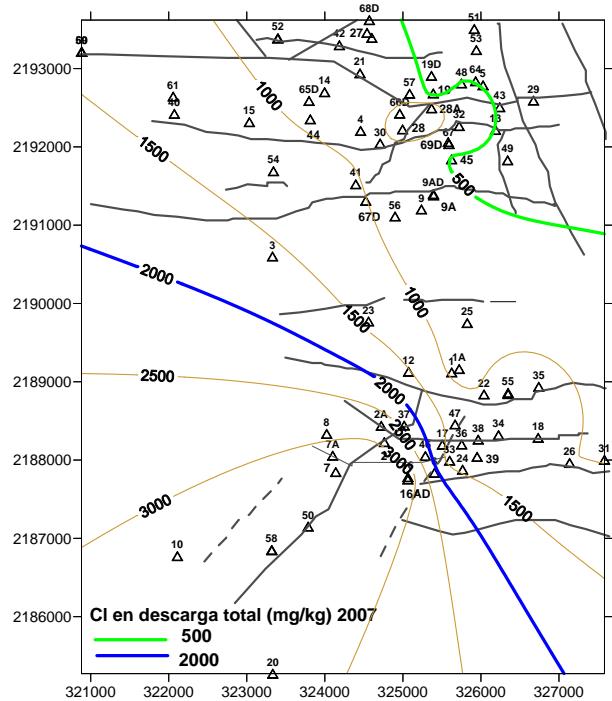


Figura 8. Distribución de cloruros en la descarga total para 2007.

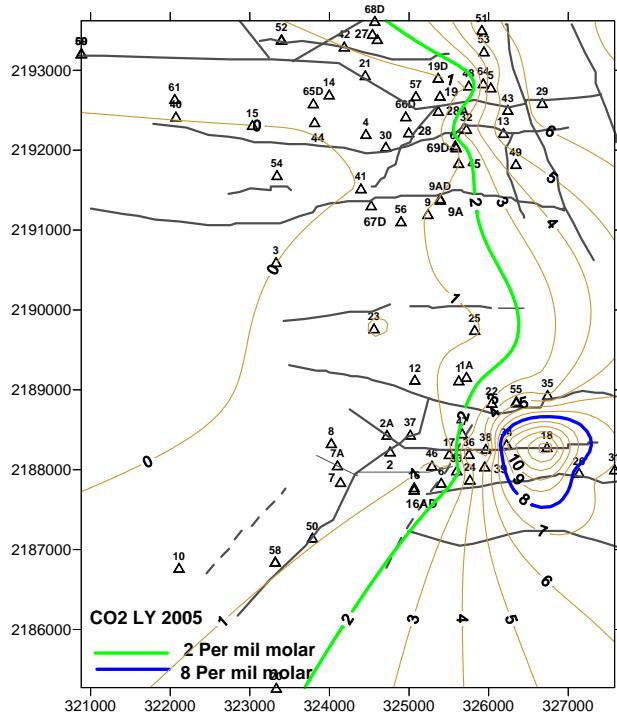


Figura 9. Distribución de CO₂ en el líquido del yacimiento para 2005.

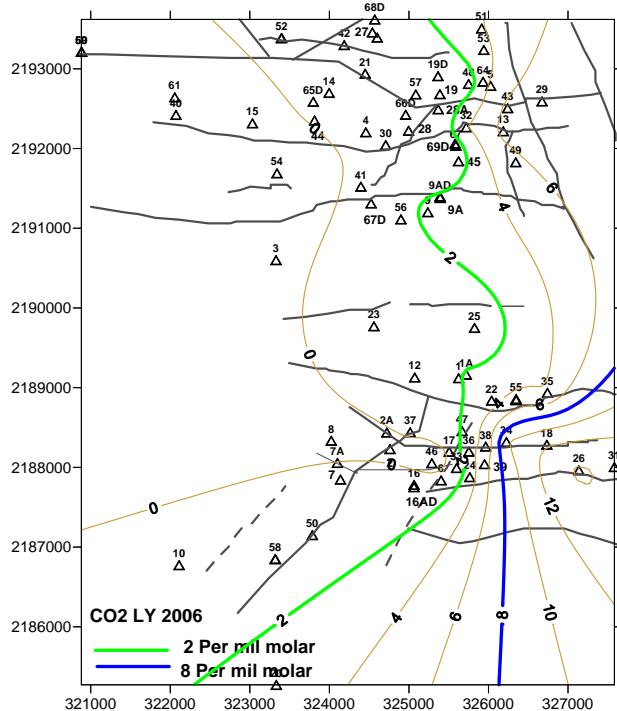


Figura 10. Distribución de CO₂ en el líquido del yacimiento para 2006.

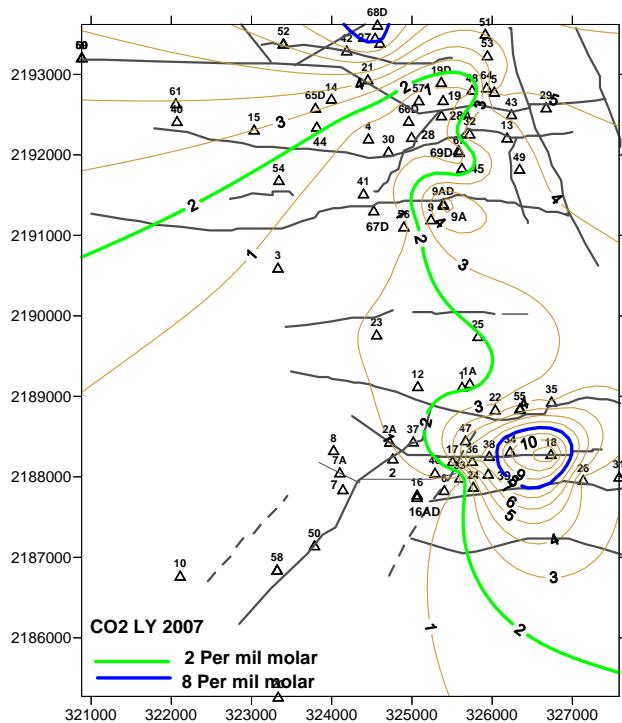


Figura 11. Distribución de CO₂ en el líquido del yacimiento para 2007.

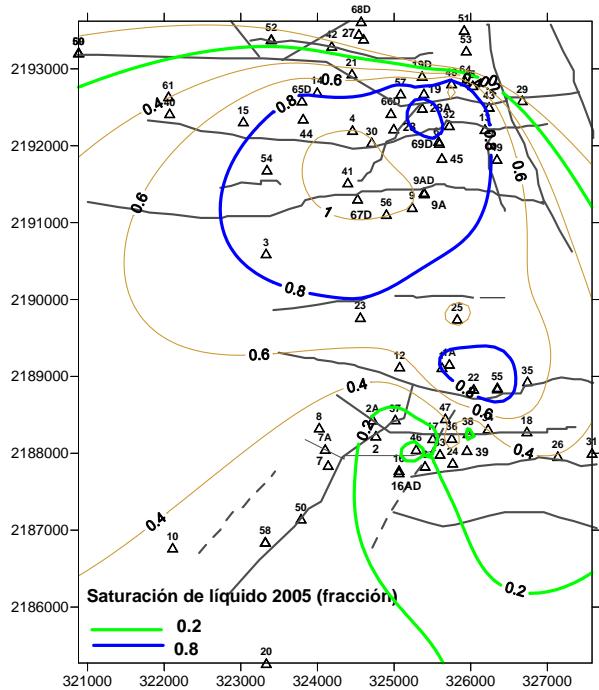


Figura 12. Distribución de saturación de líquido para 2005

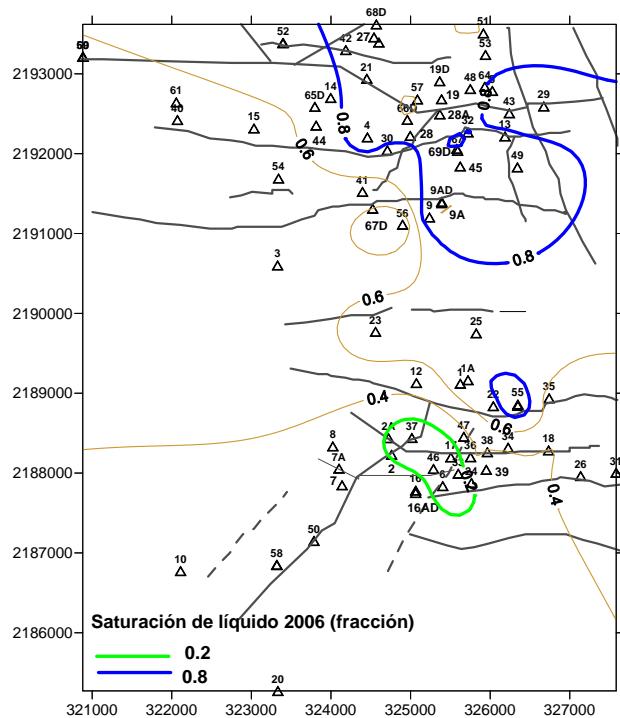


Figura 13. Distribución de saturación de líquido para 2006.

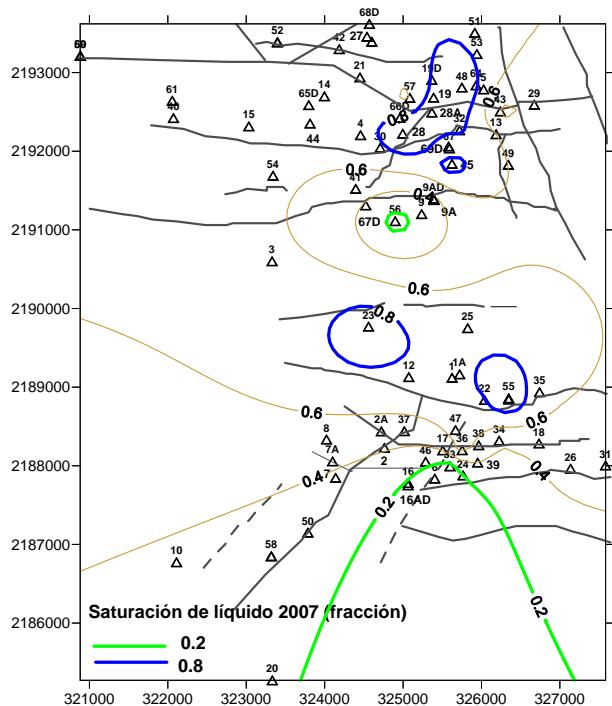


Figura 14. Distribución de saturación de líquido para 2007

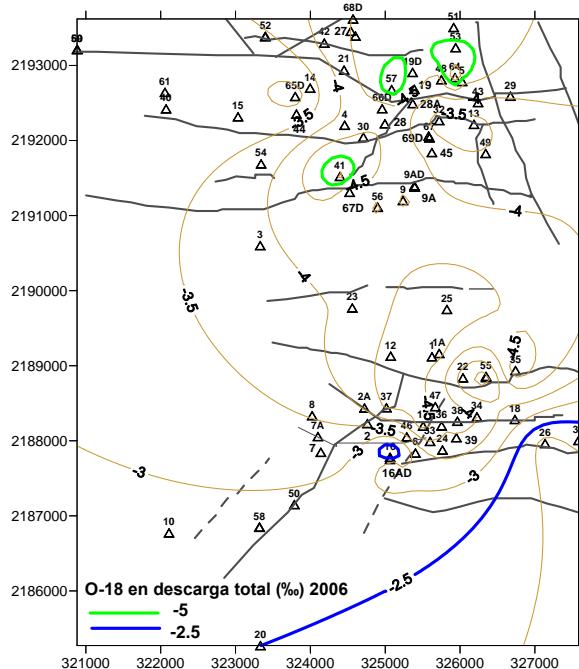


Figura 15. Distribución de $\delta^{18}\text{O}$ en la descarga total para 2006

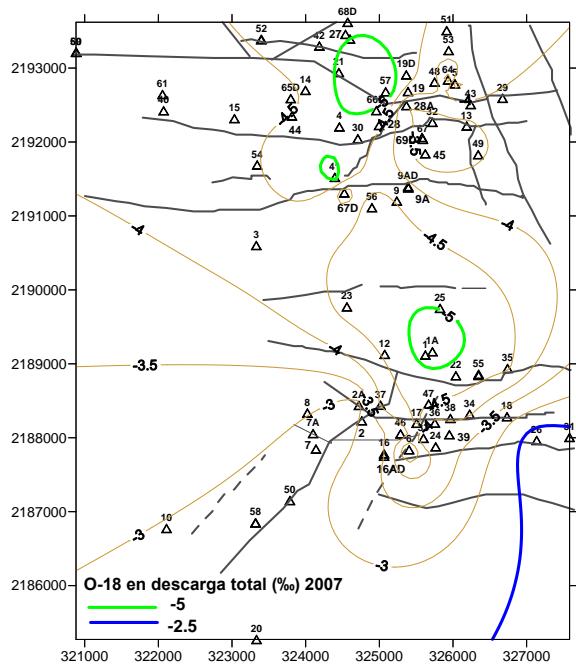


Figura 16. Distribución de $\delta^{18}\text{O}$ en la descarga total para 2007

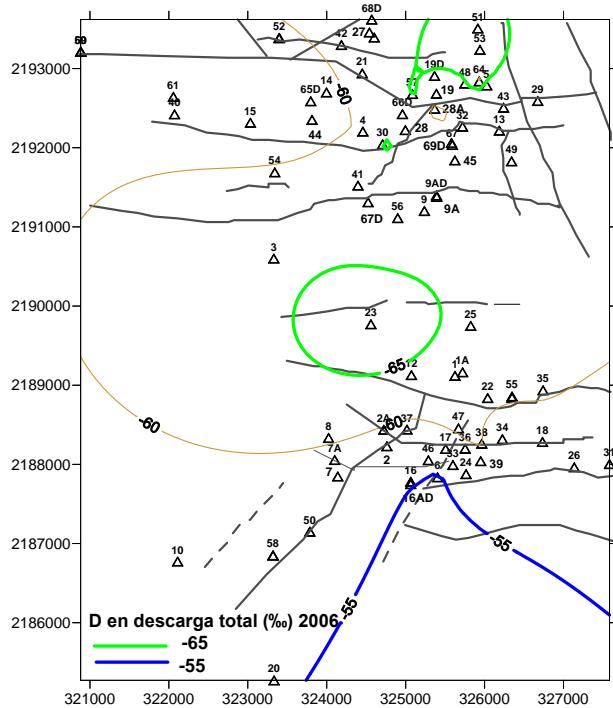


Figura 17. Distribución de δD en la descarga total para 2006

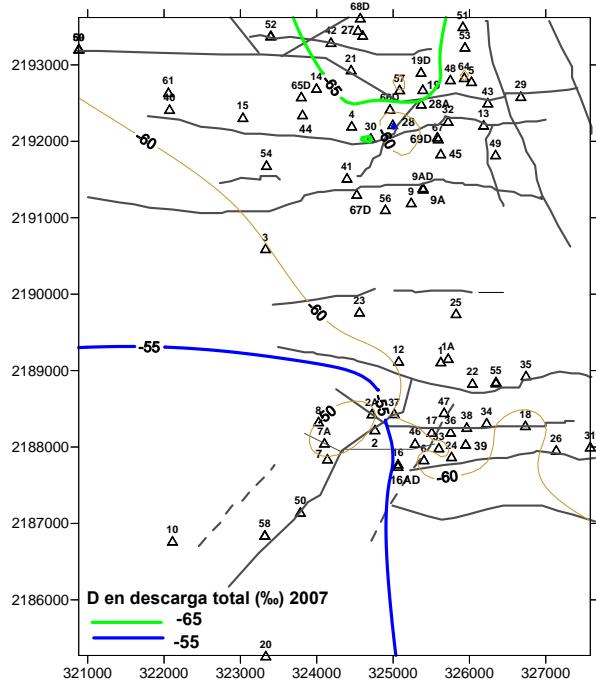


Figura 18. Distribución de δD en la descarga total para 2007

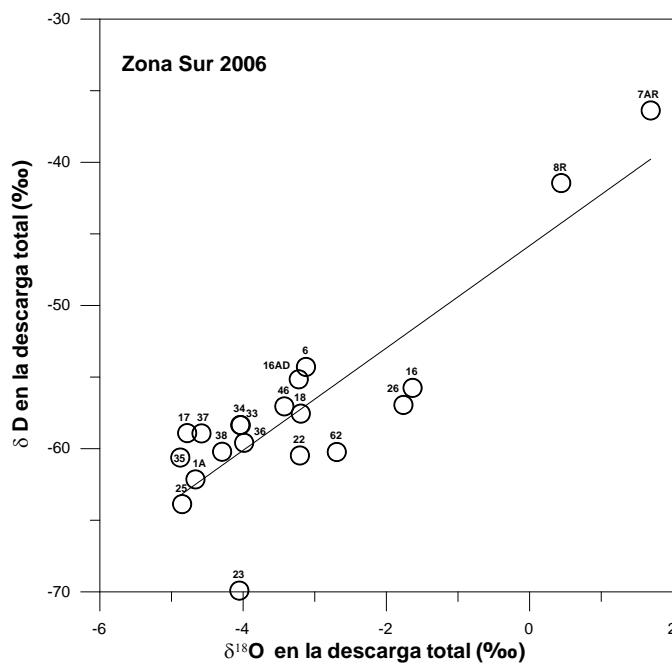


Figura 19. δD vs $\delta^{18}O$ en la descarga total de pozos de la zona sur en 2006

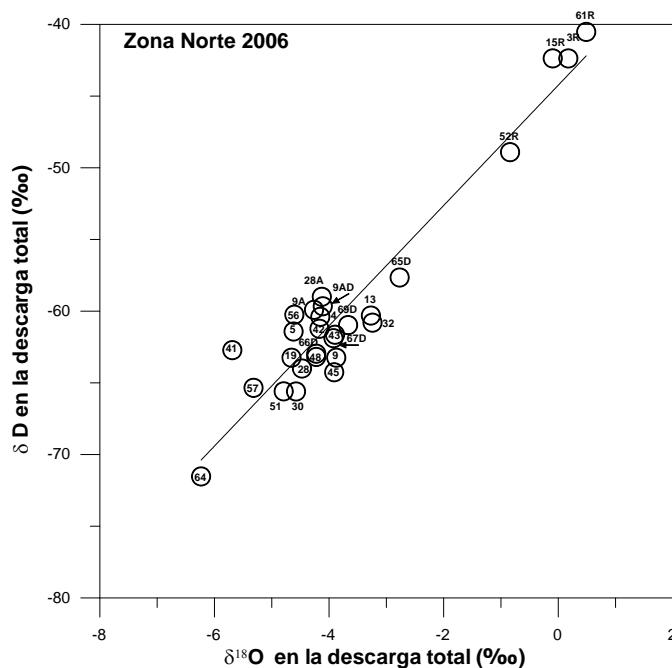


Figura 20. δD vs $\delta^{18}O$ en la descarga total de pozos de la zona norte en 2006

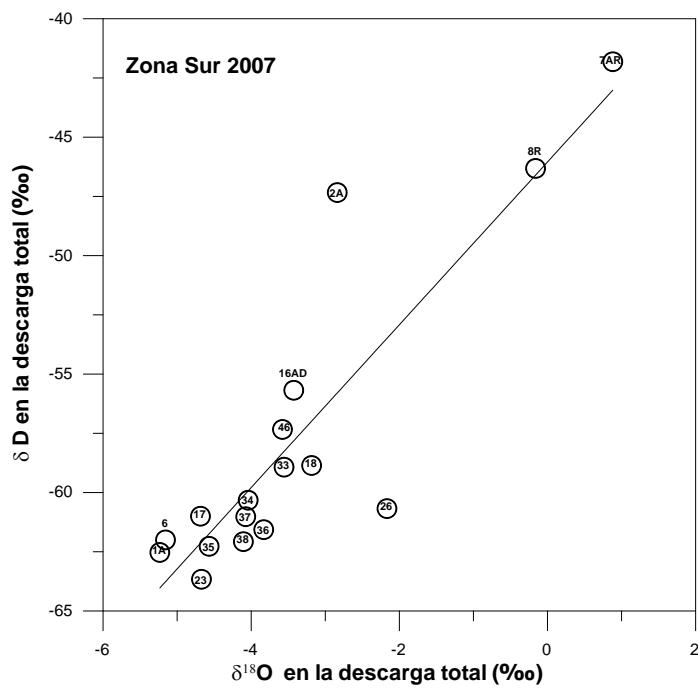


Figura 21. δD vs $\delta^{18}O$ en la descarga total de pozos de la zona sur en 2007

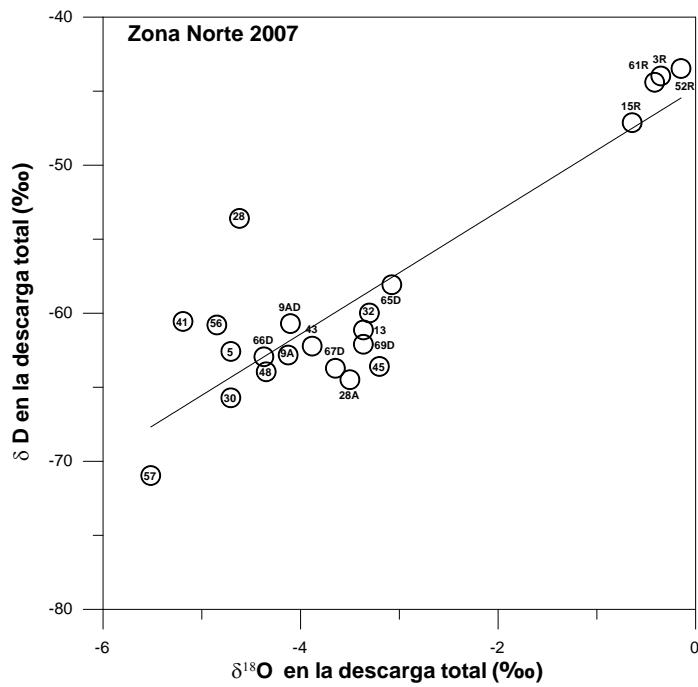


Figura 22. δD vs $\delta^{18}O$ en la descarga total de pozos de la zona norte en 2007