

Evaluación preliminar del proceso de reinyección en la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., (1989-2011) con base en las concentraciones de Cl de los fluidos producidos y de inyección

Rosa María Barragán¹, Víctor Manuel Arellano¹, Abel Hernández¹, Alfonso Aragón¹, Alfredo Mendoza² y Lisette Reyes²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, 62260, México. Correo:

rmb@iie.org.mx. ²Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Los Azufres, Campamento Agua Fría, Michoacán, México.

Resumen

La explotación geotérmica requiere un adecuado manejo de los yacimientos para asegurar su longevidad. Por ello, en la fase de explotación de yacimientos es necesario realizar estudios multidisciplinarios tendientes a identificar los efectos causados por la extracción y eventual reinyección de fluidos, cuyos resultados ayuden a plantear políticas óptimas de explotación. Entre estos, resaltan los que se enfocan a la evaluación de procesos de reinyección en los yacimientos. La reinyección de fluidos de desecho en los yacimientos ha sido una práctica común ya que evita una potencial degradación del ambiente, mitiga pérdidas de presión en el acuífero y permite un mejor barrido del calor almacenado en la roca, mejorando la eficiencia de recuperación. Aunque la reinyección se ha convertido en una operación prácticamente de rutina en la explotación de yacimientos geotérmicos, aún hay aspectos complejos por resolver cuyo impacto debe ser evaluado. Tradicionalmente esta evaluación se ha realizado por medio de pruebas de trazadores que, aunque son efectivas, pueden presentar algunos inconvenientes, por ejemplo: (a) son costosas; (b) las trayectorias de flujo de los fluidos pueden cambiar debido a gradientes de presión inducidas por la producción; y (c) es difícil realizar el monitoreo exhaustivo de todos los pozos productores para identificar y cuantificar el trazador. Por tanto, se recomienda analizar el movimiento de los fluidos en el yacimiento monitoreando el comportamiento tanto de especies químicas e isotópicas en los fluidos producidos así como de las variables de producción de pozos a través del tiempo. En este trabajo se realizó un estudio para la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., basado en las variaciones de cloruros de los fluidos producidos y de reinyección y en los gastos de reinyección a través del tiempo, para estimar los porcentajes de retornos de reinyección presentes en las descargas de los pozos productores. El estudio se realizó tanto para pozos individuales como a nivel “campo”, para la zona sur. Cualitativamente se encontró que los pozos de reinyección de la zona sur en su conjunto (AZ-7, AZ-7A y AZ-8) afectan a los pozos de producción. Algunos de los resultados relevantes del estudio muestran por ejemplo, que en el pozo AZ-2 la producción de retornos de reinyección se incrementó de 55% en 1990 a más de 90% en 2001; en el pozo AZ-16 se identificó una producción de retornos de reinyección de casi 90% en 1993 y una tendencia de disminución en la producción de retornos de 82% en 2007 a 29% en 2011. A nivel de la zona sur, la máxima producción de retornos de reinyección (42.5%) ocurrió en 1990, coincidente con un pico en el gasto de inyección, y los valores mínimos (entre 7 y 8.8%) se hallaron en 1998, 1999 y 2004, coincidiendo con mínimos gastos inyectados (1998 y 1999) y posteriormente con la salida de operación del pozo AZ-7. Los porcentajes de retornos de reinyección producidos en la zona sur se correlacionaron con la entalpía promedio de la misma zona sur del campo geotérmico de Los Azufres y se obtuvo una correlación significativa que indica que a mayor producción de retornos de reinyección la entalpía promedio de la zona sur tiende a decrecer. Estos resultados preliminares

sugieren que una parte importante de fluido inyectado en la zona sur probablemente fluye hacia áreas fuera del campo por lo que el proceso de reinyección debe optimizarse para recargar el yacimiento de forma más efectiva y prolongar su vida útil. Este estudio se efectuará también en la zona norte y posteriormente en todo el campo.

Palabras clave: Geoquímica, reinyección, cloruros, producción, pozos inyectores, pozos productores.

Preliminary assessment of reinjection process in the south zone of the Los Azufres, Mich., geothermal field (1989-2011) based on chloride concentrations of production and reinjection fluids

Abstract

Geothermal exploitation requires optimal reservoir policies in order to ensure its longevity. For this reason during the exploitation stage multidisciplinary studies are needed to identify the effects on the reservoir caused by the extraction and eventual reinjection of fluids. Among these studies, those focused on the assessment of reinjection processes are very important. Waste fluids reinjection has become a common practice in geothermal exploitation to avoid potential pollution to the environment, to mitigate pressure drops in the aquifer and also to allow a better sweep of the heat stored in the rock improving recovery efficiency. Currently, although reinjection is practically a routine practice in geothermal exploitation there are still complex aspects to be solved whose impact has to be assessed. Traditionally this assessment has been done by means of tracer tests which are effective although they may show some inconveniences i.e. (a) they are expensive; (b) the fluid flow paths can change due to pressure drops induced by production; (c) it is difficult to perform exhaust monitoring of all production wells to identify the tracer. Therefore, it is recommended to better analyze the movement of fluids in the reservoir by monitoring chemical species in production and injection fluids. In this work a study to assess the impact of reinjection on the south zone of the Los Azufres geothermal field was developed, based on the variations of chloride concentrations in production and reinjection fluids and on the reinjection mass flow rates, over time. By this approach the reinjection returns produced by production wells were estimated. The study was developed for individual wells and also at a “field” level, considering the south zone as the “field”. Qualitatively it was found that both reinjection wells of the south zone (AZ-7 which later became AZ-7A, and AZ-8) have impact on the production wells. Some important results showed that in well AZ-2 the production of reinjection returns increased from 55% in 1990 to more than 90% in 2001; in well AZ-16 a production of almost 90% of reinjection returns in 1993 was identified with a tendency to decrease to 82% in 2007 and to 29% in 2011. For the south zone the maximum production of reinjection returns (42.5%) occurred in 1990, which coincides with a peak of injection, while minimum values (between 7 and 8.8%) of reinjection returns were estimated in 1998, 1999 and 2004 which is coincident with minimum injection rates (1998 and 1999) and later with the fact that well AZ-7 was out of line. The annual estimated reinjection returns for the south zone were related to the annual average bottom-hole enthalpy and a significant correlation was obtained, which indicates that at higher production of reinjection returns the enthalpy tends to decrease. These results also suggest that an important part of the injection fluids in the south zone probably flow toward areas outside the field and that the reinjection process should be optimized to provide recharge to the reservoir more effectively. This study will be done for the north zone and for the whole field.

Key words: Geochemistry, reinjection, chlorides, production, injection wells, production wells.

Introducción

La explotación geotérmica requiere un adecuado manejo de los yacimientos para asegurar su longevidad (Kaya et al., 2011). Por esto, en la fase de explotación de yacimientos es necesario realizar estudios multidisciplinarios tendientes a identificar los efectos causados por la extracción y eventual reinyección de fluidos, cuyos resultados ayuden a plantear políticas óptimas de explotación. Entre los estudios citados resaltan por su importancia los que se enfocan a la evaluación de procesos de reinyección de fluidos en los yacimientos. La reinyección de fluidos de desecho en los yacimientos ha sido una práctica común ya que evita una potencial degradación del ambiente causada por la disposición de especies químicas contenidas en los fluidos (algunas de ellas nocivas) en la superficie, al mismo tiempo que mitiga pérdidas de presión en el acuífero (causadas por la extracción de fluidos). Además, la reinyección de fluidos permite un mejor barrido del calor almacenado en la roca, mejorando la eficiencia de recuperación. Aunque la reinyección se ha convertido en una operación prácticamente de rutina en la explotación de yacimientos geotérmicos, hay aún aspectos complejos por resolver para evaluar cualitativa y cuantitativamente su impacto. Tradicionalmente esta evaluación se ha realizado por medio de pruebas de trazadores, las cuales, aunque son efectivas presentan algunas desventajas importantes (Horne y Szucs, 2007); p. ej. (a) son costosas; (b) las trayectorias de flujo de los fluidos pueden cambiar debido a gradientes de presión inducidas por la producción y (c) es difícil realizar el monitoreo exhaustivo de todos los pozos productores para identificar y cuantificar el trazador (algunos pozos pueden recibir el trazador después de un período de tiempo muy largo). Por estas razones, es más recomendable analizar el movimiento de los fluidos en el yacimiento monitoreando el comportamiento tanto de especies químicas e isotópicas en los fluidos producidos como de los datos de producción de pozos.

Debido a que cada sistema geotérmico es único, hasta la fecha no existe una metodología de tipo general que permita evaluar cuantitativamente el impacto de la reinyección en los yacimientos para asegurar su explotación sustentable. El objetivo de este trabajo es estimar de manera razonable el porcentaje de recuperación de fluidos reinyectados en yacimientos geotérmicos en explotación, así como identificar la comunicación entre pozos productores y reinyectores para facilitar la toma de decisiones en la definición de estrategias óptimas de explotación que aseguren la sustentabilidad del recurso energético. En el caso de que los fluidos de reinyección consistan de fluidos de desecho (agua separada y vapor condensado que sufren procesos de evaporación al ambiente) se esperará un incremento en la salinidad de los pozos de mezcla que producen retornos de reinyección a través del tiempo. Esta característica permite identificar de forma cualitativa si existe alguna relación entre pozos productores y reinyectores. En los pozos de vapor no puede notarse el aumento de salinidad, por lo que usualmente se estudian las variaciones de las composiciones isotópicas, así como de las especies volátiles en el vapor producido. Cuando se cuenta con historiales largos de composiciones químicas de fluidos de pozos de mezcla, el comportamiento de los iones a través del tiempo permite identificar de manera cualitativa la presencia de retornos de reinyección en los pozos.

Se seleccionaron para su estudio datos de pozos de la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., aprovechando su disponibilidad así como el hecho de que el yacimiento ha producido por cerca de 30 años y, por tanto, cuenta con historias largas de producción/reinyección. La localización de los

pozos en el campo geotérmico de Los Azufres se presenta en la Figura 1 (todas las figuras al final del texto). Es importante notar que los pozos reinyectores se localizan en la parte oeste del campo y se distribuyen de la manera siguiente: pozos AZ-7, AZ-7A (el pozo AZ-7A reemplazó al pozo AZ-7) y AZ-8 en la zona sur y AZ-3, AZ-15, AZ-52 y AZ-61 en la zona norte. La mezcla de reinyección consiste de agua separada y vapor condensado. Esta mezcla sufre importantes procesos de evaporación al ambiente por lo que las concentraciones de iones son elevadas con respecto a los fluidos producidos originalmente y su composición isotópica también sufre enriquecimiento.

Metodología

La metodología utilizada en este trabajo se basa en la comparación de patrones de comportamiento de cloruros entre pozos productores y reinyectores a través del tiempo, para reconocer cambios de concentración en pozos productores atribuibles al proceso de reinyección. Para el análisis de datos se utilizó el método propuesto por Harper y Jordan (1985). Este método toma en consideración el “reciclado” de fluidos que consiste en el hecho de que los fluidos producidos que contienen retornos de reinyección (RI) son producidos de nuevo sufriendo un nuevo flasheo. La fracción (x) de retornos de reinyección (RI) producidos por un pozo productor, se obtiene del balance dado en la Ecuación (1):

$$x = (Cl_1 - Cl_2)/(Cl_3 - Cl_2) \quad (1)$$

donde Cl_1 es el promedio de Cl para el pozo productor en la unidad de tiempo considerada (diario, semanal, mensual, anual), Cl_{YAC} ; Cl_2 es la concentración base promedio de Cl del pozo productor o línea base promedio, Cl_{YAC} y Cl_3 es la concentración promedio de Cl calculada por separado para cada línea de reinyección, Cl_{RI} . El cálculo de “x” (Ecuación 1) permite la estimación del porcentaje de retornos de reinyección (RI) producidos. En este trabajo se utilizaron promedios anuales y se aproxiaron los cloruros del yacimiento a los cloruros de la descarga total. Asimismo, se tomaron los cloruros más tempranos de cada pozo como los valores iniciales base para efectuar los balances, independientemente para cada pozo.

Resultados

La Figura 2 muestra los historiales de reinyección en el campo. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de los cloruros producidos por pozos de mezcla de la zona sur a través del tiempo y en la Figura 4 se presenta el comportamiento de cloruros de pozos de la zona norte.

La Figura 3 permite definir dos comportamientos. Los pozos que producen retornos de reinyección en la tendencia superior muestran un aumento gradual en la concentración de cloruros en el tiempo, como es el caso de los pozos: AZ-1A, AZ-2, AZ-2A, AZ-16, AZ-33, AZ-36 y AZ-46. En contraste, los pozos que muestran concentraciones de cloruros aproximadamente estables en la tendencia inferior de la gráfica, se ven afectados menórramente o no afectados por la reinyección, como es el caso de los pozos: AZ-22, AZ-26 y AZ-62.

Como puede observarse en la Figura 4, las concentraciones de cloruros en los pozos de la zona norte muestran tendencias más estables con respecto a los pozos de la zona sur, aunque con concentraciones muy diferentes entre sí, desde pozos con cloruros mínimos (AZ-56 y AZ-56Rep), hasta

concentraciones por encima de los 4,000 mg/kg en el agua separada. Esto indica que los efectos de la reinyección en la zona norte del campo son menos significativos que en la zona sur.

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de los cloruros contenidos en las descargas totales de algunos pozos de la zona sur del campo junto con las composiciones de cloruros de los pozos de reinyección. Segundo se observa en esa figura, se nota una respuesta casi inmediata a la reinyección en algunos de los pozos que producen fluidos bifásicos. Cualitativamente se puede afirmar que en conjunto los pozos de reinyección (AZ-7, AZ-7A y AZ-8) afectan a los pozos productores, aunque el hecho de que algunas veces las concentraciones de cloruros sean más altas en los pozos AZ-2 y AZ-16 que en el reinyector AZ-8 permite suponer que aquellos reciben un aporte más importante de los pozos AZ-7 y AZ-7A, que tienen mayor concentración de cloruros. Es importante considerar que los flujos básicos reinyectados no son constantes y que las composiciones de los fluidos de reinyección son variables, así como el hecho de que los pozos AZ-7, AZ-7A y AZ-8 se localizan relativamente cercanos entre sí (ver Figura 6).

En la Tabla 1 se muestran las estimaciones anuales promedio realizadas para el pozo AZ-2, de acuerdo a los datos disponibles. Si se considera un promedio de cloruros de los pozos AZ-7 y AZ-8 en el tiempo, en lugar de considerar cada pozo por separado, el pozo AZ-2 produciría los porcentajes de retornos de reinyección dados en la Tabla 2. Con el propósito de obtener valores ponderados, para el cálculo del promedio de cloruros de los pozos AZ-7 y AZ-8 se tomaron en cuenta los promedios anuales del gasto inyectado en cada pozo.

AÑO	Cl _{DT} AZ-2 (mg/kg)	Cl promedio (mg/kg) Pozo AZ-7	x	RI (%)	Cl promedio (mg/kg) Pozo AZ-8	x	RI (%)
1980	1446						
1990	2564	4353.84	0.39	38.4	2650.8	0.93	92.8
1993	3141	5199.58	0.45	45.2	3578.8	0.79	79.5
1995	3443	5333.18	0.51	51.4	4378.5	0.68	68.1
1996	3854	6291.38	0.50	49.7	2866.4	NA	NA
1997	4075	6636.92	0.51	50.6	3175.1	NA	NA
2000	4042	5366.68	0.66	66.2	3317.3	NA	NA
2001	3949	5526.00	0.61	61.3	3246.4	NA	NA

(NA: Cálculo no aplicable debido a que la concentración de cloruros del pozo productor es mayor que la del pozo inyector).

Tabla 1. Estimaciones de porcentajes de retornos de reinyección (RI) producidos por el pozo AZ-2.

El proceso de datos mostrado para el pozo AZ-2 se aplicó a los demás pozos de mezcla de la zona sur. Los porcentajes de retornos de reinyección producidos a través del tiempo por pozos de la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres, considerando el promedio de cloruros de los pozos reinyectores AZ-7 y AZ-8 y AZ-7A y AZ-8, se presentan en la Figura 7. Como puede observarse, los pozos AZ-2 y AZ-16 son los que presentan mayor presencia de retornos de reinyección, hallándose valores hasta del 100% en el caso del pozo AZ-16. Los porcentajes de RI obtenidos en los pozos AZ-2, AZ-2A y AZ-16 muestran una tendencia creciente en el tiempo, mientras que en los pozos AZ-33, AZ-36 y AZ-46 la tendencia es a decrecer. Los resultados dados en la Figura 7 se comparan razonablemente con los

expuestos por Barragán et al. (2005, 2009, 2010) para algunos pozos (como el AZ-2; AZ-16 y AZ-46), en los que por medio de balances isotópicos se estimó que los fluidos producidos consistían de entre 51 y 76% de agua de reinyección respectivamente.

AÑO	Cl _{DT} AZ-2 (mg/kg)	Cl _{PROM} AZ-7 y AZ-8 (mg/kg)	x	RI (%)
1980	1446			
1990	2564	3478.59	0.55	55.00
1993	3141	4446.21	0.56	56.50
1995	3443	4973.44	0.57	56.61
1996	3854	5058.3	0.67	66.66
1997	4075	4759.35	0.79	79.35
2000	4042	4422.24	0.87	87.22
2001	3949	4218.12	0.90	90.29

Tabla 2. Porcentajes de retornos de reinyección (RI) producidos por el pozo AZ-2 considerando las concentraciones de cloruro promedio de los pozos AZ-7 y AZ-8.

En la Figura 8 se muestran las composiciones de cloruros de las mezclas de los pozos AZ-7 y AZ-8 y AZ-7A y AZ-8, estimadas tomando en cuenta los promedios anuales de volúmenes inyectados en cada pozo. En esta figura se observa que a pesar del incremento de cloruros de reinyección al inicio de 2003, los pozos AZ-33, AZ-36 y AZ-46 no presentan ninguna respuesta positiva en cuanto a la producción de líquido.

En la Tabla 3 se muestran datos de entalpías promedio y cloruros promedio anuales de la zona sur del campo de Los Azufres (Arellano et al., 2012), junto con los resultados de porcentajes de retornos de reinyección producidos.

La Figura 9 presenta las estimaciones de porcentajes de reinyección producidos en la zona sur del campo de Los Azufres, con base en el análisis de concentraciones de cloruros. Se puede apreciar en ella que las estimaciones de porcentajes de retornos de reinyección producidos en la zona sur del campo siguen la forma de la suma de gastos inyectados en los pozos AZ-7 y AZ-8.

Como puede observarse, hasta el 40% de fluidos producidos en la zona sur (en 1990) consistieron de retornos de reinyección, mientras que en 1998 y 1999 se tuvieron estimaciones mínimas de producción de retornos de reinyección, con valores apenas por encima del 5%, coincidiendo con mínimas tasas de reinyección. El resto de fluidos de reinyección seguramente se dispersa fuera de los límites de los sectores de producción y reinyección de la zona sur del campo.

En la Figura 10 se muestra la variación de la entalpía promedio de la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres contra los porcentajes de retornos de reinyección producidos. Como es de esperarse, hay una correlación que indica que a mayor producción de retornos de reinyección la entalpía tiende a decrecer. El ajuste obtenido muestra una pendiente de -7.23 y una ordenada al origen de 2595 kJ/kg, con un coeficiente de correlación de 0.64. Si se remueve el dato de 2005, que muestra entalpía propia de vapor, el coeficiente de correlación de ajuste aumenta a 0.66. En la Figura 10 el punto correspondiente a 2005 indica una entalpía prácticamente de vapor por lo que pudiera ser removido.

Probablemente la entalpía promedio de la zona sur aumentó de forma no proporcional en 2004 y 2005 debido a que sólo hubo un pozo reinyector operando, el pozo AZ-8.

Año	Entalpía (kJ/kg)	Cl _{RI} (mg/kg)	Cl _{PROM} (mg/kg)	x	% RI
1978	1192.7		1395.1		
1979	2022.8		1511.6		
1980	2376.6		1463.5		
1981	1831.1		1158.5		
1982	1913.6		1557.8		
1983	2431.8		1524.5		
1984	2368.2		1596.5		
1985	2155.4		1815.5		
1986	2270.0		1418.3		
1987	1993.6		838.5		
1988	2455.5		1270.6		
1989	2407.8	3283.81	1483.2	0.26	26.36
1990	2237.2	3478.59	1960.8	0.43	42.51
1991	2288.9	4373.49	2078.6	0.35	35.08
1992	2382.5	4407.48	1869.5	0.29	28.89
1993	2408.1	4446.24	2012.1	0.33	32.53
1994	2375.4	4033.32	1917.1	0.34	33.76
1995	2224.0	4973.32	1935.7	0.27	26.54
1996	2351.3	5058.17	2378.3	0.36	36.49
1997	2368.7	4759.35	1915.2	0.27	27.46
1998	2480.1	4885.54	1170.6	0.08	8.21
1999	2438.3	4343.85	1083.8	0.07	7.00
2000	2281.1	4422.24	2025.1	0.33	33.11
2001	2288.2	4218.06	2123.2	0.38	38.01
2002	2506.8	2094.80	1098.6	0.21	20.70
2003	2528.4	4603.85	1707.1	0.23	23.07
2004	2611.1	4573.02	1167.0	0.09	8.80
2005	2627.9	3535.85	1400.9	0.21	20.85
2006	2507.2	3668.42	1416.8	0.20	20.43
2007	2475.4	3642.59	1582.9	0.27	26.55
2008	2450.3	4574.34	1610.7	0.21	20.67
2009	2441.6	4005.77	1469.6	0.20	19.92
2010	2477.1	4355.08	1676.4	0.24	23.83
2011	2446.1	4432.85	1434.8	0.17	16.59

Tabla 3. Valores promedio anuales de entalpía de fondo, cloruros de reinyección (Cl_{RI}), cloruros promedio de la zona sur (Cl_{PROM}), fracción y porcentaje de retornos de reinyección (RI) producidos en la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres.

Conclusiones

Las estimaciones de retornos de reinyección obtenidas para la zona sur del campo de Los Azufres, tomando como base las concentraciones de cloruros, se consideran razonables aún con las limitaciones del método y del hecho de considerar valores promedio anuales, tanto de los fluidos producidos como de los fluidos de reinyección. Se concluye que en la zona sur se ha producido un máximo de casi 45% de retornos de reinyección, en 1990, que coincide con un pico en el gasto de inyección. El resto de fluido inyectado probablemente fluye hacia áreas fuera del campo. Preliminarmente estos resultados sugieren que debe optimizarse el proceso de reinyección en la zona sur del campo para recargar el yacimiento de forma más efectiva y prolongar su vida útil. Se propone efectuar este análisis también para la zona norte y posteriormente para todo el campo.

Agradecimientos

Los datos presentados son parte del proyecto “Monitoreo isotópico de fluidos de pozos productores, pozos de reinyección y manantiales del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán”, desarrollado para la Residencia Los Azufres, CFE, en 2011. Los autores agradecen a las autoridades de la Residencia Los Azufres de la Comisión Federal de Electricidad por proporcionar los datos y permitir su publicación.

Referencias

- Arellano, V.M., R.M. Barragán, A. Paredes, S. López y A. Aragón, 2012. Respuesta del yacimiento de Los Azufres a la explotación 2003-2011. Informe Final IIE/11/14283/I 01/F del Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Federal de Electricidad, 303 p.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal and F. Sandoval, 2005. Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, δD) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, Vol. 34, pp. 527-547.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, 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*, Vol. 22, pp. 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 & Torres-Alvarado (Eds.), 2010, Taylor & Francis Group, London, pp. 137-140.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, A. Aragón e I. Martínez, 2011. Monitoreo isotópico de fluidos de pozos productores, pozos de reinyección y manantiales del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, 2011. Informe IIE/11/14154/I 01/F del Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Federal de Electricidad, 72 p.
- Harper, R.T. and O.T. Jordan, 1985. Geochemical changes in response to production and reinjection for Palinpinon-I geothermal field, Negros Oriental, Philippines. *Proceedings of 7th New Zealand Geothermal Workshop*, pp. 39-44.

Horne, R.N. and P. Szucks, 2007. Inferring well to well connectivity using non-parametric regression on well histories. *Proceedings 28th Annual PNOC-EDC Geothermal Conference*, Makati City, Philippines, pp. 147-152.

Kaya E., S.J. Zarrouk and M.J. O'Sullivan, 2011. Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 47-68.

FIGURAS

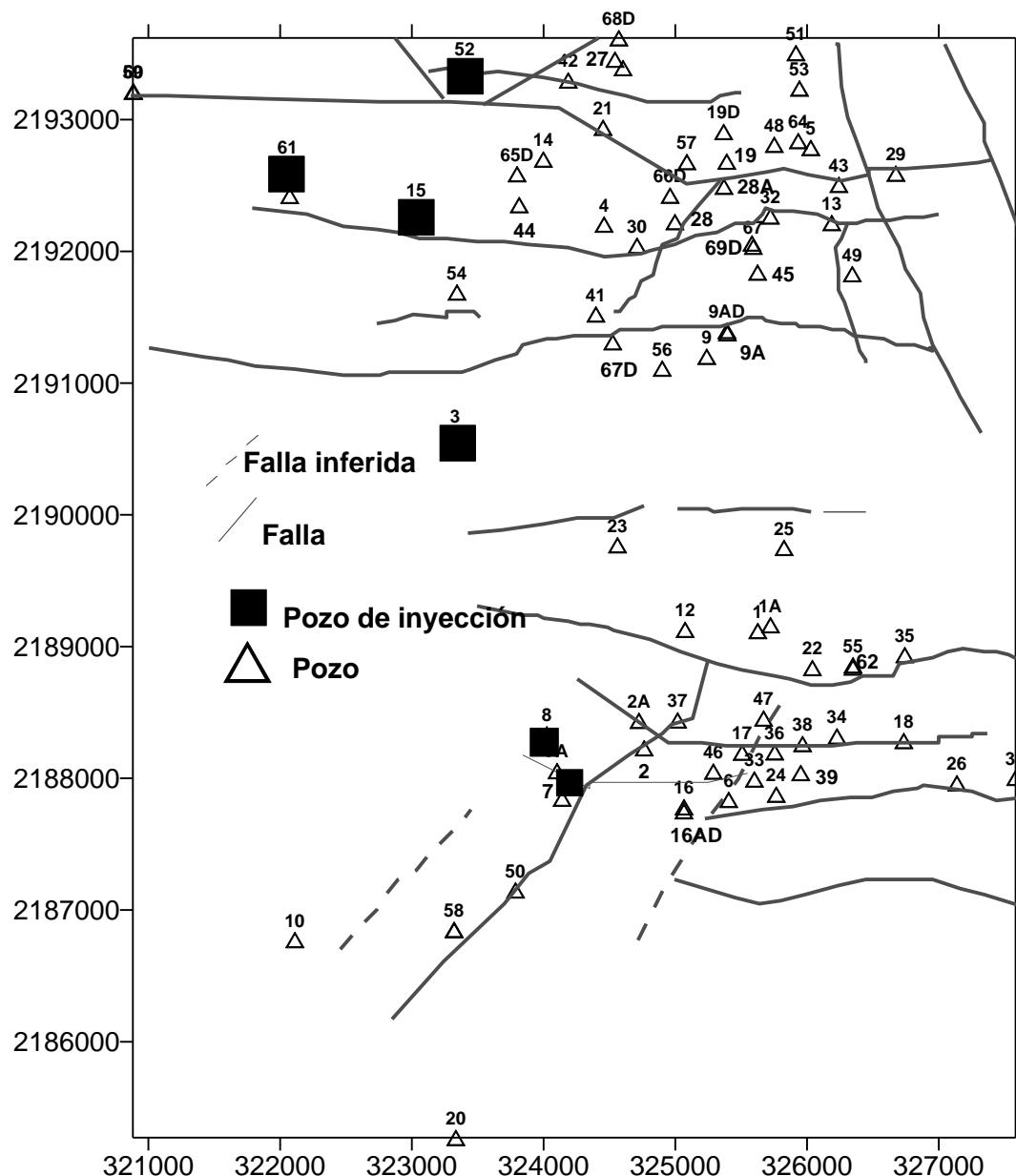


Figura 1. Localización de pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán.

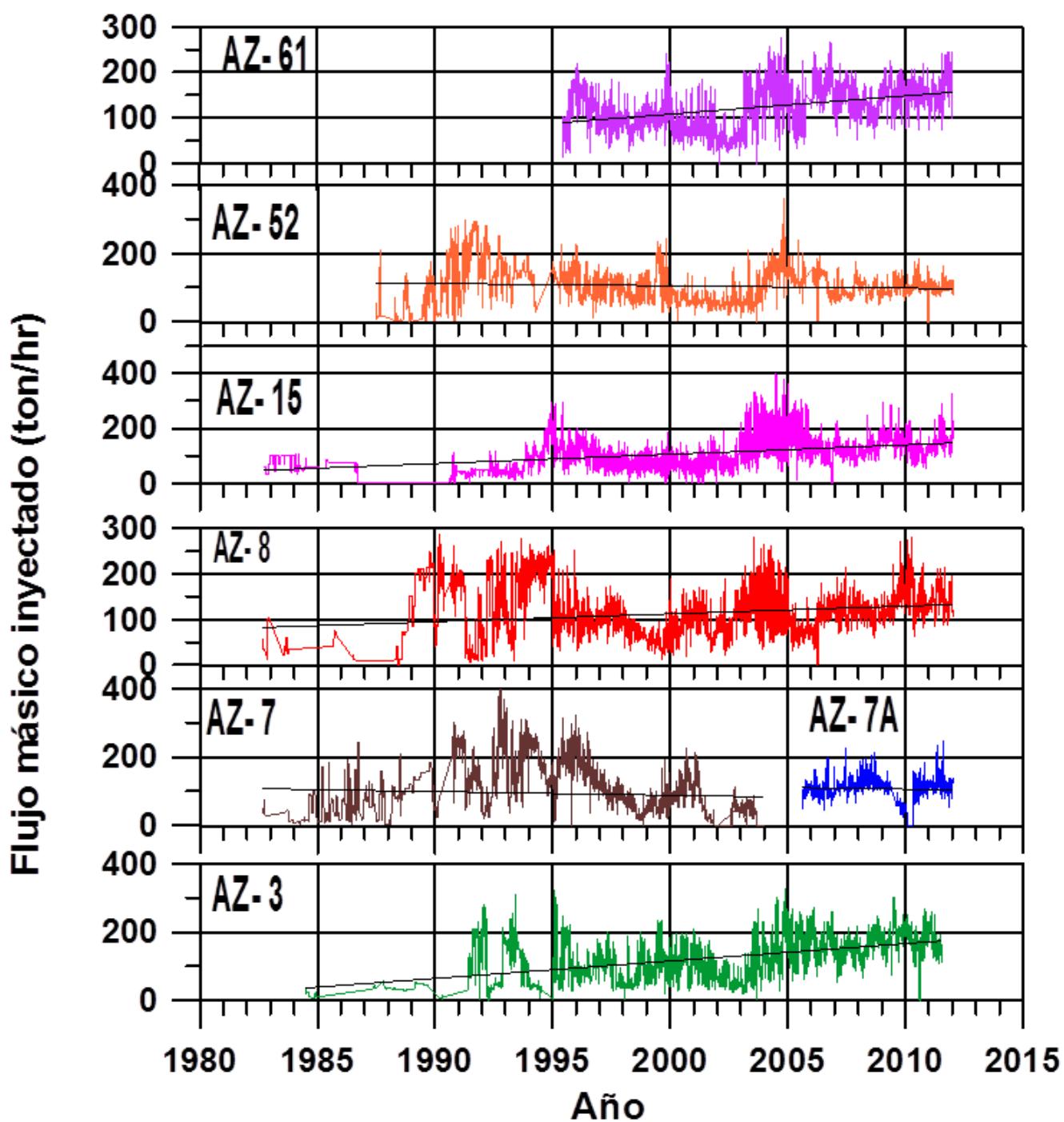


Figura 2. Historiales de reinyección en el campo geotérmico de Los Azufres.

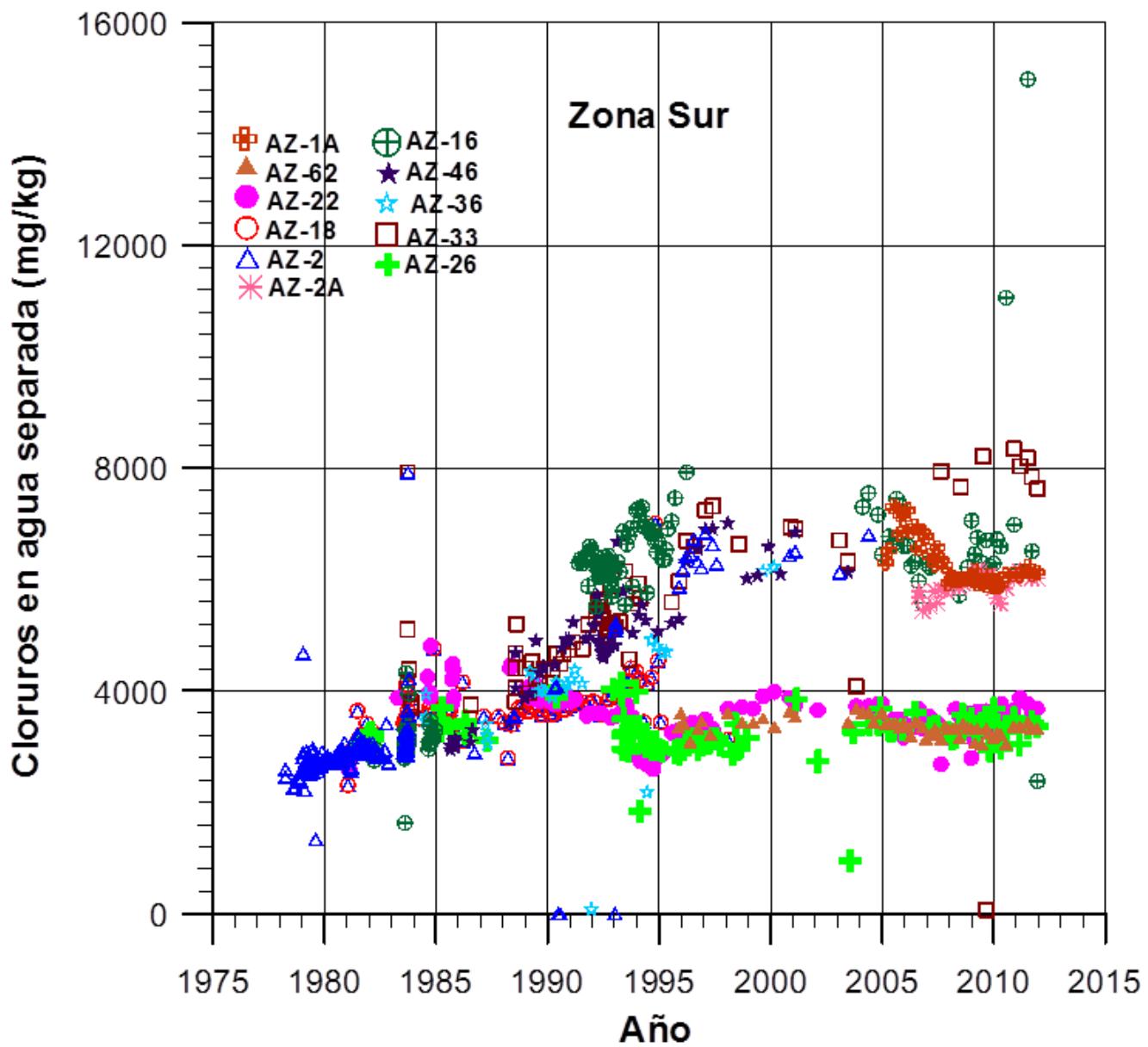


Figura 3. Cloruros en el agua separada de pozos de la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres.

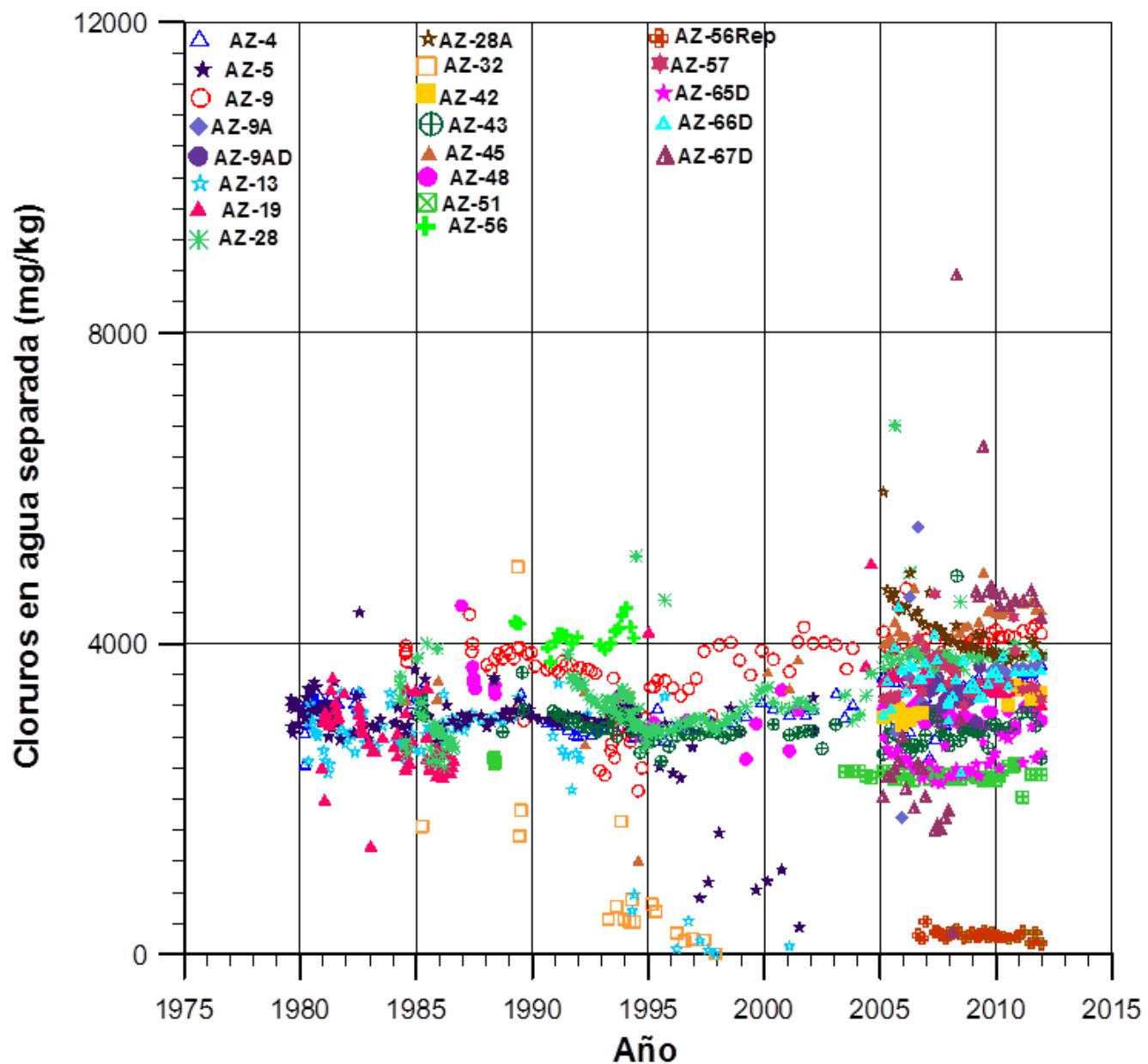


Figura 4. Cloruros en el agua separada de pozos de la zona norte del campo geotérmico de Los Azufres.

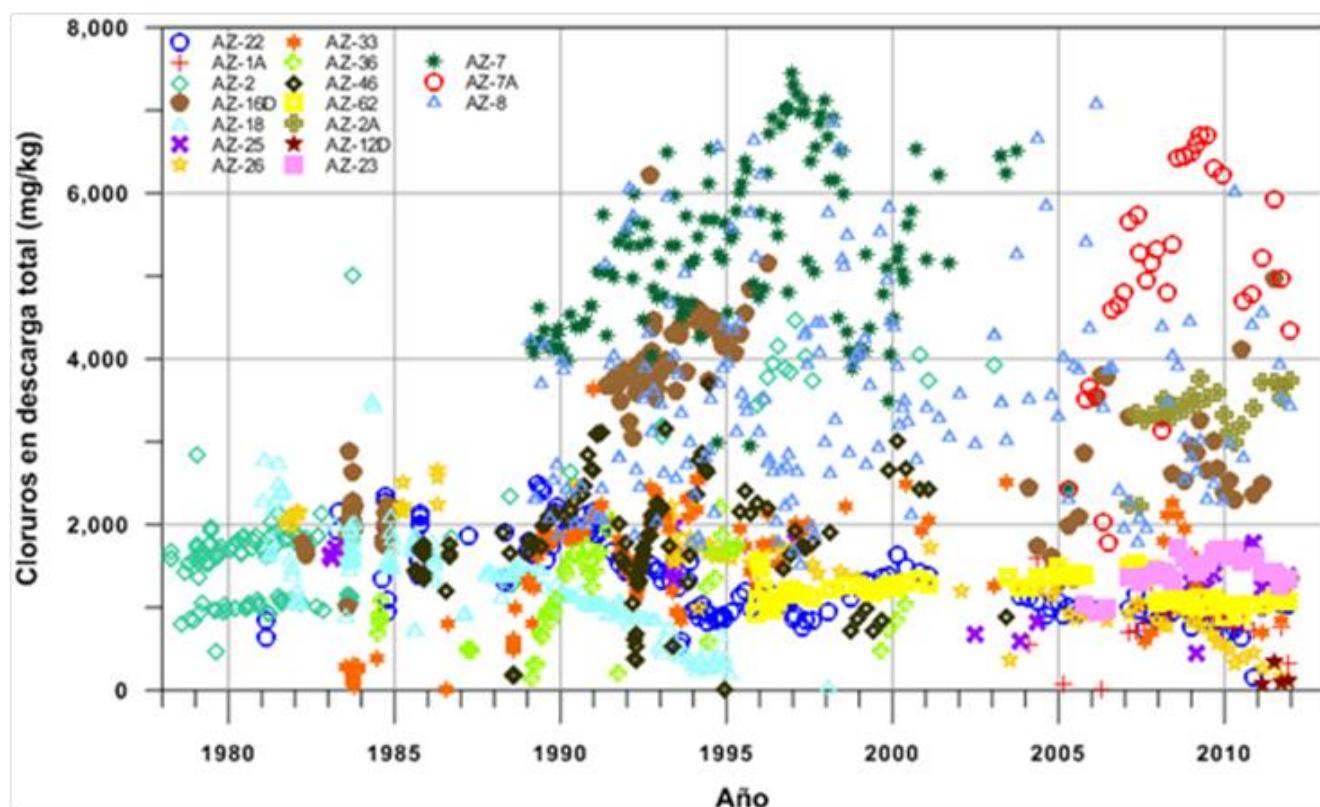


Figura 5. Cloruros de las descargas totales de pozos de la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres y de los pozos de reinyección AZ-7, AZ-7A y AZ-8.

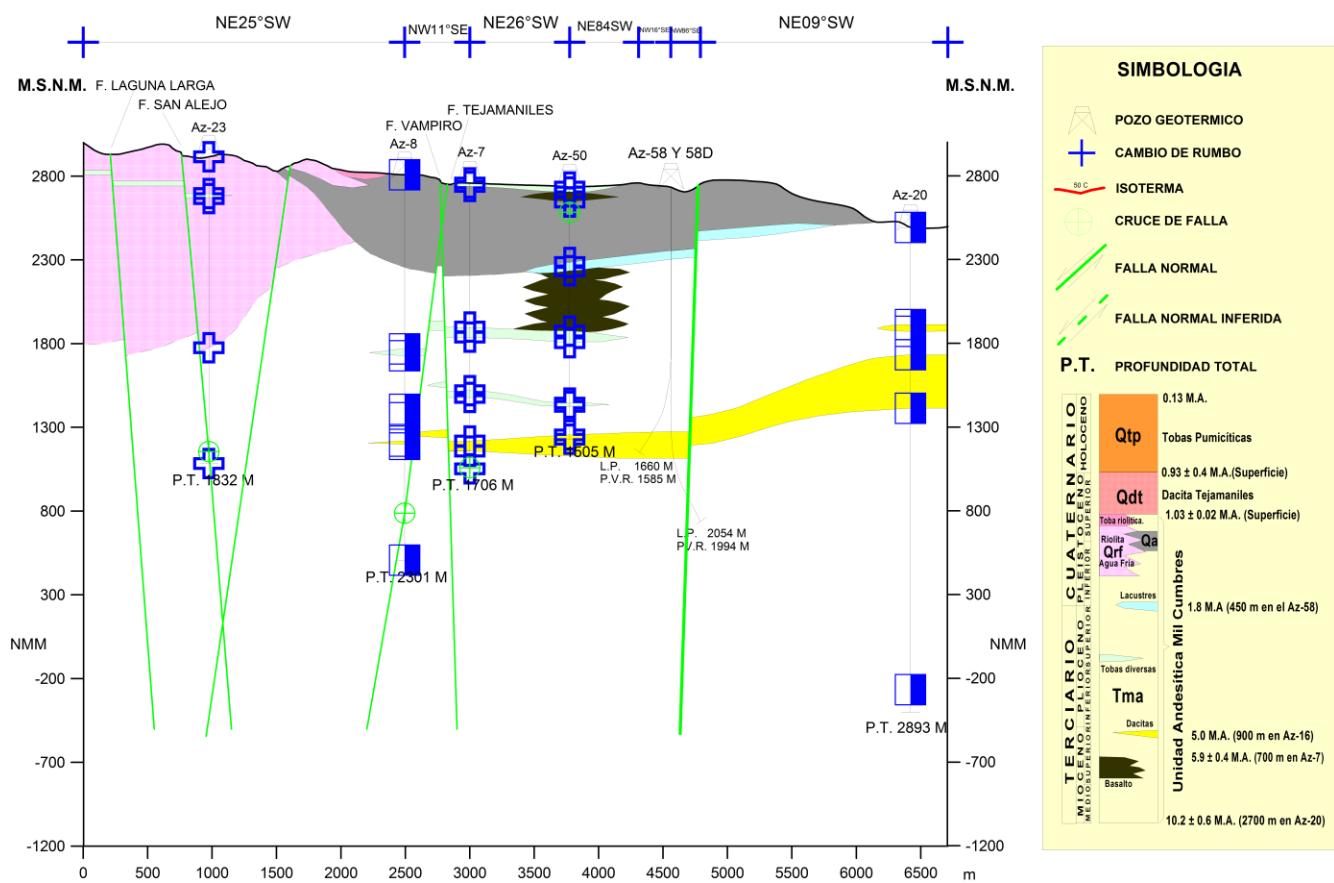


Figura 6. Sección geológica que muestra las terminaciones de los pozos reinyectores AZ-7 y AZ-8 en la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres.

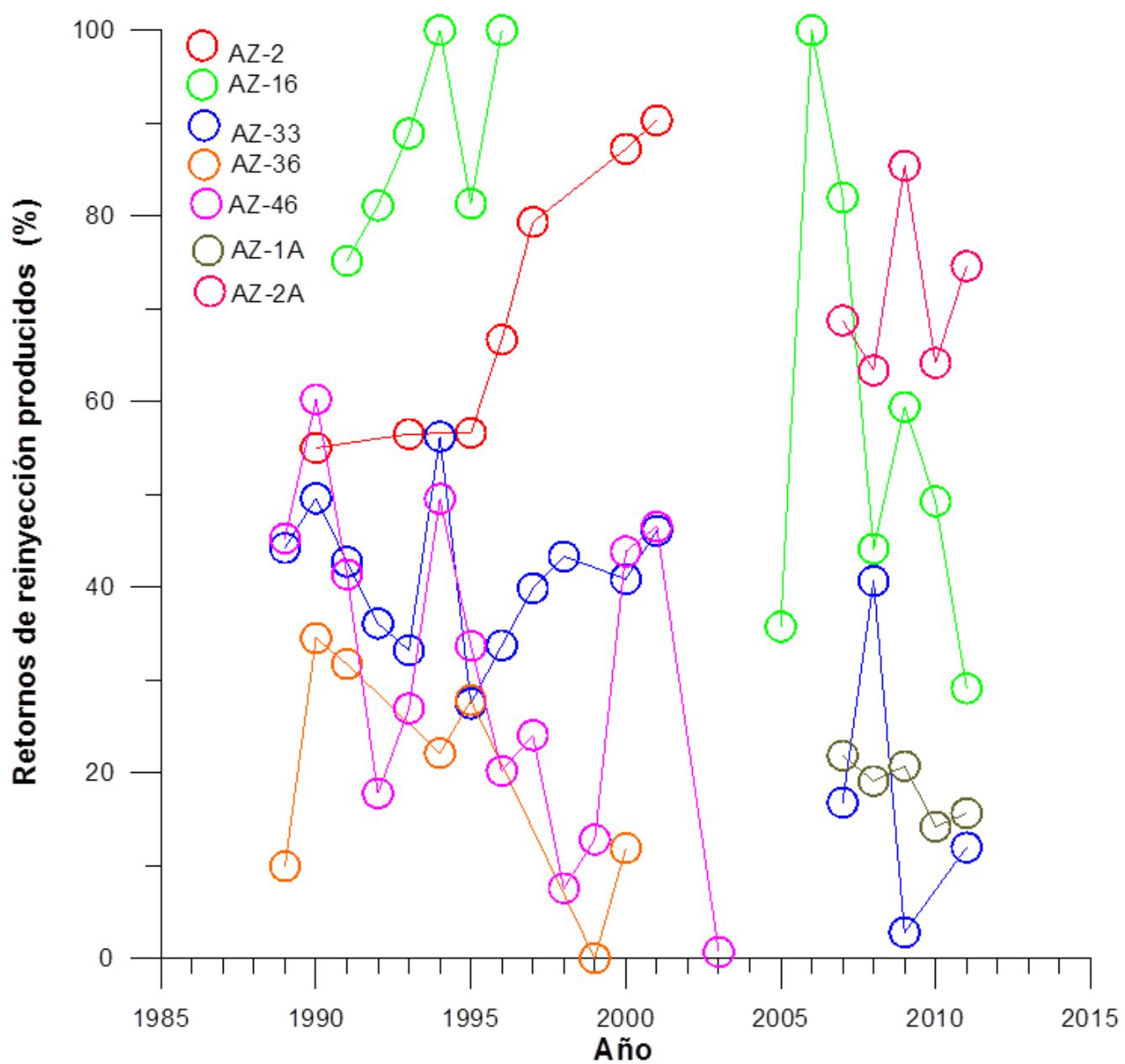


Figura 7. Porcentajes de retornos de reinyección producidos por pozos de la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres.

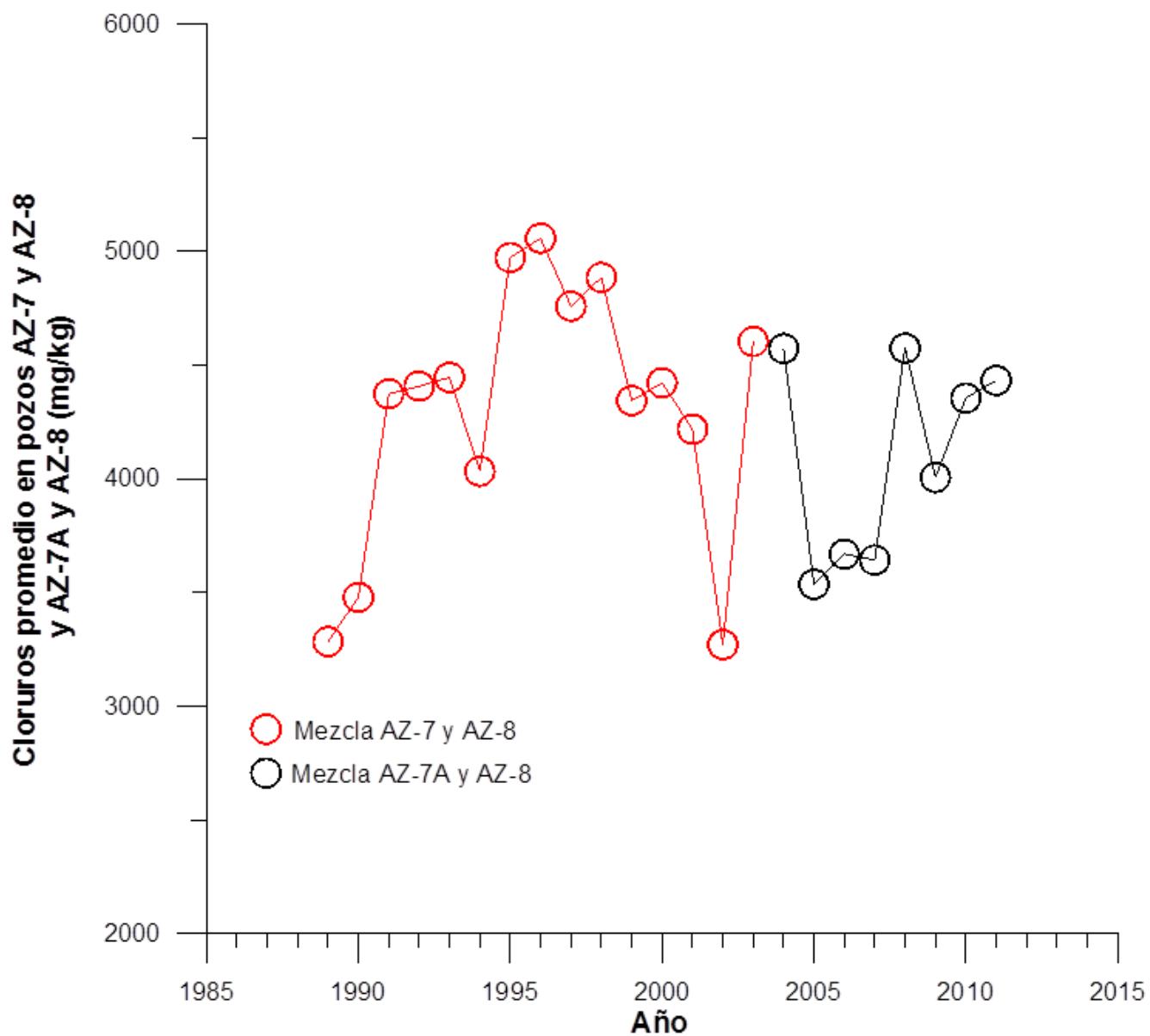


Figura 8. Cloruros promedio en fluidos de reinyección en los pozos AZ-7 y AZ-8 y AZ-7A y AZ-8.

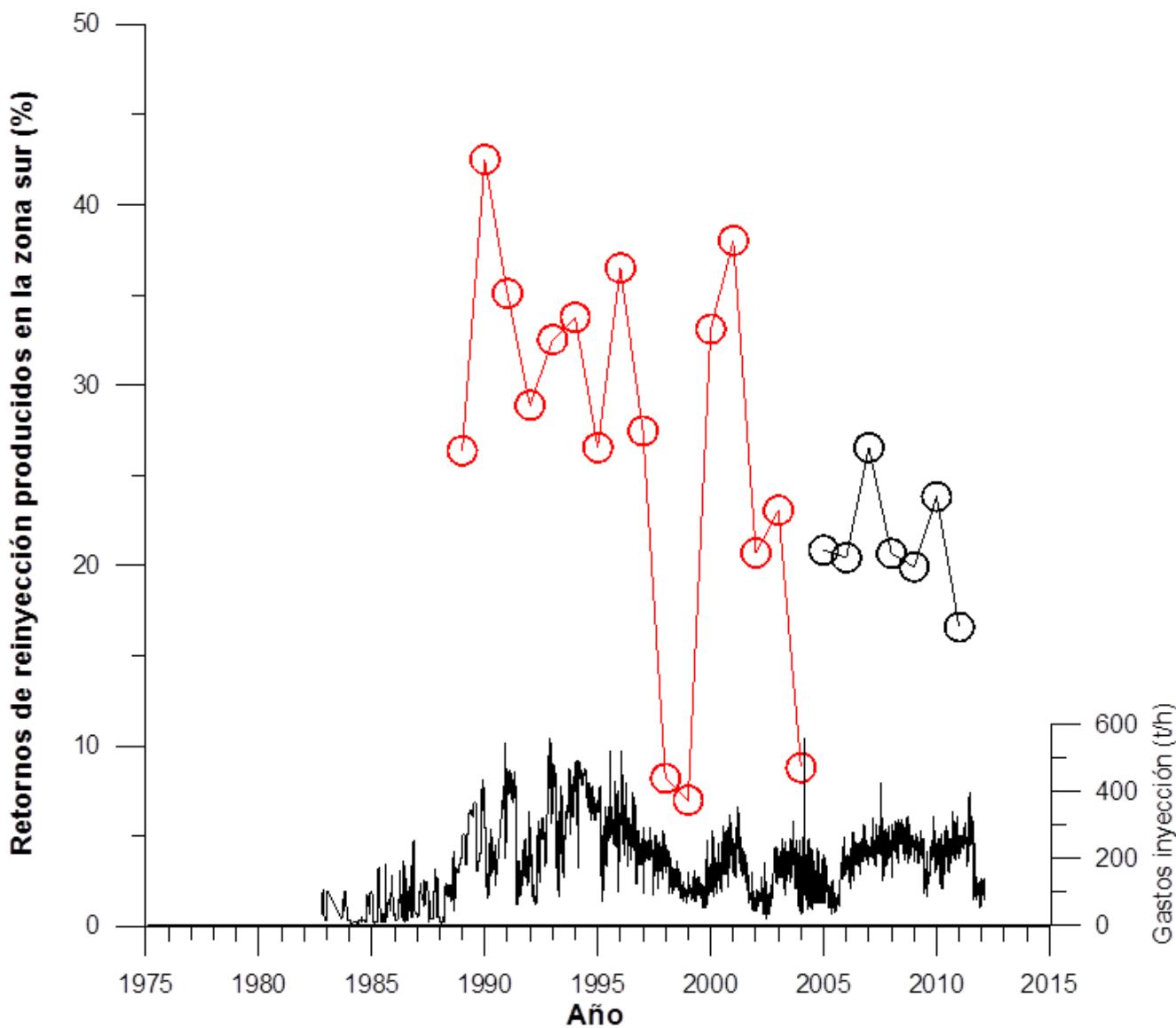


Figura 9. Porcentajes de retornos de reinyección producidos en la zona sur del campo de Los Azufres, estimados con base en el análisis de concentraciones de cloruros y suma de gastos inyectados en los pozos AZ-7 y AZ-8 y AZ-7A y AZ-8.

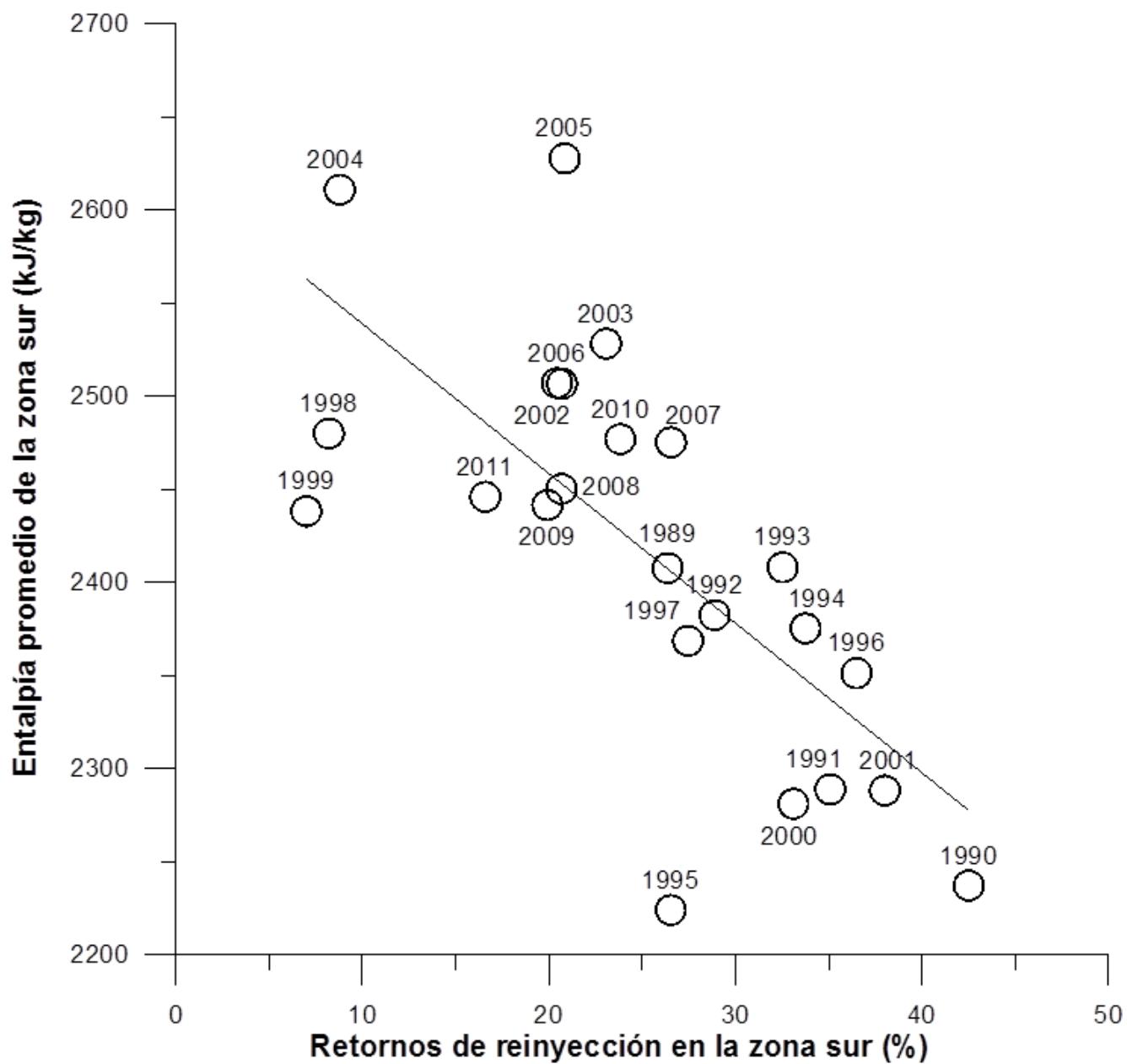


Figura 10. Variación de la entalpía promedio de la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres contra los porcentajes de retornos de reinyección producidos.