

## Estudio sobre reinyección y conectividad entre pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Abel F. Hernández<sup>1</sup>, Víctor Manuel Arellano<sup>1</sup>, Rosa María Barragán<sup>1</sup>, Emigdio Casimiro<sup>2</sup>,  
Lisette Reyes<sup>2</sup> y Alfredo Mendoza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, 62260, México. Correo:

[afho@iie.org.mx](mailto:afho@iie.org.mx). <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Los Azufres, Campamento Agua Fría, Michoacán, México

### Resumen

Con el fin de evaluar el efecto de la reinyección y la conectividad entre los pozos, se estudiaron registros históricos de producción y de monitoreo del yacimiento del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., México. Los datos de producción correspondieron a los pozos de producción de vapor o de mezcla líquido-vapor. Con el objetivo de estimar la conectividad entre los pares de pozos inyector-productor, se utilizó el método de regresión no paramétrica ACE (sigla en inglés de *Esperanza Condicional Alternante*) para correlacionar los gastos de los pozos de inyección con las concentraciones de cloruro medidas en los pozos de producción de mezcla o con las presiones de fondo de los pozos de producción de vapor. Los resultados estadísticos se analizaron a la luz de estudios previos de campo basados en pruebas de trazadores así como en registros históricos de concentraciones tanto de especies químicas como de isótopos. Nuestro estudio evaluó el efecto relativo de la reinyección a través de las concentraciones de cloruros del yacimiento y, por primera vez, mediante las historias de presión de fondo de los pozos de producción, tanto de la zona sur como de la zona norte de este campo geotérmico. Nuestro análisis sugiere que los índices de conectividad estimados por el método ACE para algunos pares de pozos concuerdan con datos previos del yacimiento. Para mejorar la evaluación o poder calibrar nuestras estimaciones es necesario compararlas adicionalmente con otros tipos de datos de yacimiento.

*Palabras clave:* Reinyección, producción de fluidos, ACE, geoquímica, presión de fondo.

### A study on reinjection and connectivity between wells in the geothermal field of Los Azufres, Michoacán

### Abstract

In order to assess the effect of reinjection and connectivity between wells, we studied historical records of production and reservoir monitoring of the geothermal field of Los Azufres, Michoacán, Mexico. Production data corresponded to production wells of vapor or liquid-vapor mixture. With the aim of estimating the connectivity between pairs of injection-production wells, the ACE (*Alternating Conditional Expectation*) nonparametric regression method was used to correlate injection rates of injection wells with concentrations of chloride measured in liquid-vapor mixture production wells or with bottom-hole pressures of vapor production wells. The statistical results were analyzed in the light of previous field studies based on tracer tests, as well as on historical records of both isotopes and concentrations of chemical species. Our study assessed the relative effect of reinjection through reservoir chloride concentrations and, for the first time, through histories of bottom-hole pressure from production wells, both in the southern and northern sections of the geothermal field. Our analysis suggests that connectivity indices estimated by the ACE method for some pairs of wells are consistent

with previous reservoir data. To improve our assessment or be able to recalibrate our estimates, it is necessary to additionally compare them to other types of reservoir data.

**Keywords:** Re却ection, fluid production, ACE, geochemistry, bottom-hole pressure

## 1. Introducción

El campo geotérmico de Los Azufres se encuentra en el estado de Michoacán, centro de México (Figura 1), y es operado por su propietario, la Comisión Federal de Electricidad (CFE). El campo geotérmico tiene dos áreas de producción: Marítaro en la zona norte y Tejamaniles en la región sur (Figura 1). La capacidad de generación eléctrica instalada de todo el campo es actualmente de 188 MW netos, aunque está por entrar en operación comercial una nueva planta de 50 MW. Los primeros pozos de producción comenzaron a funcionar en el año 1982. Durante el año 2008 hubo 39 pozos en operación produciendo 14.6 millones de toneladas (Mt) de vapor, acompañados de 4.53 Mt de salmuera que fue totalmente re却ectionada al yacimiento a través de seis pozos de inyección (Gutiérrez-Negrín et al., 2010; Arellano et al., 2012). Estudios previos (Barragán et al., 2005, 2010, 2011, 2013; Arellano et al., 2005, 2012; Iglesias et al., 2011) han observado y analizado el efecto que la salmuera re却ectionada tiene sobre los fluidos producidos a través de datos químicos y de isótopos de pozos de producción, así como a través de pruebas de trazadores.

El objetivo de nuestro estudio es explorar la aplicabilidad de la regresión no paramétrica ‘esperanza condicional alterante’ (ACE, por su sigla en inglés) (Breiman and Friedman, 1985) en la estimación del grado de conectividad entre pares de pozos inyector-productor del campo de Los Azufres. El método ACE fue introducido al campo de la ingeniería de yacimientos geotérmicos por Horne and Szucs (2007). En general, el método es adecuado para la correlación de variables que tienen una relación no lineal, lo cual a menudo es el caso entre variables de estado de flujo y de transporte de masa de fluidos geotérmicos. Este método se ha aplicado con anterioridad en otros campos geotérmicos para correlacionar datos históricos de cloruros de pozos productores con registros históricos de gasto de inyección con el fin de estimar la conectividad entre pozo inyector y productor (Horne and Szucs, 2007; Villacorte et al., 2010; Korkmaz Basel et al., 2011). A diferencia de los estudios anteriores, nuestra aplicación del algoritmo ACE considera también registros de presión de fondo de pozo medidos en pozos de producción de vapor, además de los datos de concentración de cloruros observados en los pozos de producción de mezcla líquido-vapor.

## 2. Metodología

Aquí hemos considerado utilizar el método estadístico no paramétrico ACE desarrollado por Breiman and Friedman (1985) para inferir el grado de conectividad entre un par de pozos: en un pozo se inyecta una mezcla líquida de vapor condensado y/o agua separada y el otro produce fluido del yacimiento. Debido a su naturaleza no paramétrica, el algoritmo ACE supone de entrada que el modelo subyacente es desconocido pero busca estimarlo a partir de los datos.

A continuación presentamos una breve descripción del método ACE; para mayor información, consultese a Breiman and Friedman (1985), así como a Horne and Szucs (2007). Sean  $X_1, X_2, \dots, X_p$  nuestras variables (aleatorias) de entrada (los gastos de flujo másico en  $p$  pozos de inyección) e  $Y$

nuestra variable (aleatoria) de salida (la concentración de cloruro medida en un pozo de producción).  $T_1(X_1)$ ,  $T_2(X_2)$ , ...,  $T_p(X_p)$  y  $T_y(Y)$  representan transformaciones arbitrarias, con media igual a cero, de las variables de entrada y salida  $X_i$  e  $Y$ , respectivamente. De acuerdo con Breiman and Friedman (1985), se puede demostrar que

$$T_y^*(Y) = \sum_{i=1}^p T_i^*(X_i) + e^* \quad (1)$$

donde  $T_1^*(X_1)$ ,  $T_2^*(X_2)$ , ...,  $T_p^*(X_p)$ , y  $T_y^*(Y)$  son estimaciones óptimas de las transformadas de las variables de entrada ( $X_i$ ) y salida ( $Y$ ), y  $e^*$  es un error de media igual a cero, con distribución normal. Se sabe (Horne and Szucs, 2007) que el incluir al tiempo como la  $(p+1)$ -ésima variable en la Ecuación 1 mejora la regresión en el espacio transformado. Aunque tanto  $T_i^*(X_i)$  como  $T_y^*(Y)$  son desconocidos a priori, el algoritmo ACE determina sus formas funcionales al final del proceso numérico. La calidad de los resultados depende de la información contenida en los datos disponibles.

Además, el algoritmo ACE permite estimar una medida de la conectividad o índice de conexión, entre el inyector  $i$  y un pozo productor dado, por medio de la siguiente fórmula (Horne and Szucs, 2007):

$$I_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| T_i^*(X_i(t_j)) \right| \quad (2)$$

donde  $i$  es el índice del pozo inyector,  $n$  es el número total de veces (fechas) en el que se midieron los datos de inyección y producción simultáneamente y  $t_j$  es el  $j$ -ésimo tiempo o fecha en la que se registraron mediciones simultáneas. Por lo tanto,  $I_i$  ( $i = 1, 2, \dots, p+1$ ) representa la magnitud promediada en el tiempo de la variable transformada  $T_i^*(X_i)$ , donde  $T_{p+1}^*(X_{p+1})$  corresponde a la variable tiempo. Un gran (pequeño) valor de  $I_i$  indica una relativamente alta (baja) conectividad entre el pozo inyector  $i$  y el pozo de producción.

El método ACE trabaja para una variable de salida y varias variables de entrada. El algoritmo requiere que los datos para todas las variables de entrada y salida se midan de manera simultánea. Si un pozo no se pudo medir en una fecha determinada, ese hecho haría que todos los datos de esa fecha fueran inservibles para el análisis ACE. Esto a su vez acortaría la serie de tiempo útil para ser empleada por el método ACE. En nuestros ejemplos, solamente consideramos gastos de inyección como variables de entrada pero otras cantidades medidas, tales como concentraciones de especies químicas o de isótopos, pueden considerarse también. Por otro lado, en nuestro trabajo sólo hemos utilizado las concentraciones de cloruro en la descarga total de los pozos de producción como variables de salida (una a la vez); aunque se pueden emplear también otras mediciones de especies químicas o de isótopos, o del gasto de pozos productores. La ventaja de trabajar con concentraciones de cloruro es que el Cl es un soluto conservativo que generalmente no reacciona con la roca huésped.

Algunas aplicaciones anteriores del método ACE en ingeniería geotérmica (Horne and Szucs, 2007; Villacorte et al., 2010; Korkmaz Basel et al., 2011) se han centrado en la correlación de los registros de cloruro de los pozos de producción con los gastos del flujo másico inyectado. En la siguiente sección, aplicamos este método a datos similares del campo geotérmico de Los Azufres así como a series de tiempo de presión de fondo de pozo de pozos productores de vapor del mismo campo.

### 3. Resultados

### *3.1 Zona sur del campo geotérmico de Los Azufres — Pozos de producción de mezcla líquido-vapor*

Aquí consideramos las historias de gasto de inyección de los tres pozos inyectores de la zona sur del campo de Los Azufres: Az-7, Az-8, y Az-7A (Figura 1). El inyector Az-7 cerró operaciones en 2003 y fue sustituido por el pozo Az-07A en 2005; estos dos inyectores se ubican físicamente a unos pocos metros de distancia el uno del otro. Las concentraciones de cloruro se midieron en 13 pozos de producción de mezcla líquido-vapor situados en la zona sur (Figura 1) y sus valores se incluyeron en la regresión ACE con las mediciones de los gastos de inyección. En la Figura 2 se presentan los resultados de los índices de conexión calculados.

Es conveniente hacer notar que los resultados para los pozos Az-16D y Az-62 se dividen en dos períodos, debido a la sustitución del inyector Az-7 por el pozo Az-7A. Se puede ver que la variable tiempo muestra los mayores valores del índice de conexión para la mayoría de los pares de pozos en la Figura 2. Cuando estuvo en funcionamiento, el inyector Az-7 arrojó mejores índices de conexión con los pozos productores de la zona sur que el inyector Az-8, con excepción de los productores Az-22 y Az-62; lo anterior es respaldado por la disminución del gasto de algunos pozos de producción (por ejemplo, el Az-26) durante el período en el cual el pozo Az-8 fue el único inyector (Arellano et al., 2012). Por otro lado, el pozo de inyección Az-7A presenta índices de conexión más pequeños con los pozos productores que el inyector Az-8, excepto para el productor Az-1A.

Iglesias et al. (2011) llevaron a cabo una prueba de trazadores en la zona sur del campo de Los Azufres, en la cual inyectaron un trazador de fase líquida en el pozo Az-8. Estos investigadores concluyeron que al momento de escribir su trabajo (407 días después de la inyección), la prueba no había concluido ya que el trazador aún estaba arribando a los pozos. Debido a esto, no podemos hacer una comparación entre los resultados de la prueba del trazador y la nuestra.

### *3.2 Zona norte del campo geotérmico de Los Azufres — Pozos de producción de mezcla líquido-vapor*

En la zona norte del campo de Los Azufres existen cuatro pozos de inyección: AZ-3, Az-15, Az-52 y Az-61 (Figura 1). Aquí consideramos los datos de concentración de cloruro de 17 pozos productores de mezcla líquido - vapor y los correlacionamos con los gastos del fluido inyectado en la misma zona. Los índices de conexión calculados por el algoritmo ACE se presentan en la Figura 3.

La ventaja de usar datos de cloruros es que uno puede ser capaz de discriminar entre los fluidos de reinyección procedentes directamente de los pozos de inyección y los fluidos cuyo origen es condensado de vapor de líquido reinyectado el cual es más diluido en sales. Esto último se observó recientemente (Arellano et al., 2012), a través de análisis de gases, en la zona norte y también en algunos pozos de la zona sur.

La variable tiempo presenta los mayores índices de conexión para la mayoría de los pozos de producción (Figura 3). Los inyectores Az-3 y Az-52 muestran la mayor conectividad con la mayoría de los pozos productores del sector norte, aunque el pozo de inyección Az-61 presenta los valores de índice más grandes con los pozos de producción Az-9, Az-19 y Az-51.

### *3.3 Zona sur del campo geotérmico de Los Azufres — Pozos de producción de vapor*

Para este caso, utilizamos series de tiempo de la presión de fondo de pozo de los nueve pozos de producción de vapor en forma conjunta con los gastos de flujo másico de los tres pozos de inyección de la zona sur (Figura 1). Para nuestro conocimiento, esta es la primera vez que un análisis ACE de datos de producción de vapor se presenta en la literatura.

Como en el primer caso aquí presentado, la sustitución del inyector Az-7 por el pozo Az-7A dio lugar a la división del análisis ACE en dos partes para cada par inyector-productor. Los resultados del algoritmo ACE se presentan en la Figura 4. Los pozos Az-33, Az-36, y Az-46 se consideraron como pozos de fase líquida (Sección 3.1) y también como pozos de fase vapor, porque en sus etapas iniciales su producción consistió mayormente de líquido. En etapas posteriores estos pozos produjeron solamente vapor. Los resultados de la Figura 4 muestran que el tiempo es, con mucho, la variable con los mayores índices de conexión, en promedio, en un grado mayor que el de los pozos de mezcla líquido-vapor de la zona sur. Sólo el inyector Az-7 muestra un índice mayor que la variable tiempo cuando ese inyector se correlaciona con el productor Az-6. Por otro lado, los índices del inyector Az-8 son en general mayores que los de los inyectores Az-7 y Az-7A. Sin embargo, cuando se compara con el otro inyector, el pozo Az-7 presenta sus índices de conexión más grandes con los pozos de producción Az-6, Az-34 y Az-37, mientras que el inyector Az-7A muestra algo similar cuando se correlaciona con los productores Az-6, Az-33, Az-35 y Az-37.

En su estudio de campo, Iglesias et al. (2011) también inyectaron un trazador de fase vapor en el pozo Az-8. Ellos concluyeron que esta prueba estuvo completa al momento de informar sus resultados. Sus mayores recuperaciones se registraron en los pozos Az-2A (0.018 %), Az-46 (0.002 %), Az-16AD ( $8.6 \times 10^{-4}$  %), Az-37 ( $3.3 \times 10^{-4}$  %) y Az-6 ( $2.9 \times 10^{-4}$  %). Podemos observar que nuestros resultados muestran un índice de conexión relativamente grande para el productor Az-46, en concordancia con la prueba de trazadores. Sin embargo, es difícil establecer una comparación más completa ya que ese estudio de campo no incluyó la inyección de un trazador en el pozo Az-7A.

#### 4. Conclusiones

Nuestro estudio evaluó el efecto relativo de la reinyección a través del monitoreo de la concentración de cloruros y, por primera vez, de las historias de presión de fondo de pozo medidas en los pozos de producción de las secciones sur y norte del campo geotérmico de Los Azufres. Nuestro análisis sugiere que los índices de conectividad estimados por el método de ACE para algunos pares de pozos concuerdan con datos previos del yacimiento. Se requiere una comparación con otros tipos de datos del yacimiento para poder evaluar o recalibrar nuestras estimaciones.

#### Agradecimientos

Los autores desean agradecer a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (CFE) por otorgar su permiso para publicar este trabajo. También agradecemos al Prof. Roland Horne por proporcionarnos una copia computacional de su algoritmo ACE.

#### 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*, Vol. 34, 592–616.

Arellano, V.M., R.M. Barragán, S. López, A. Paredes, and A. Aragón, 2012. Respuesta del yacimiento de Los Azufres a la explotación 2003-2011. Informe final, IIE/11/14283/02F, Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Federal de Electricidad, Cuernavaca, Morelos, México. Inédito.

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*, Vol. 34, 527–547.

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). *Water Rock Interaction*, Birkle and Torres-Alvarado (Eds.), Taylor & Francis Group, London, pp. 137–140.

Barragán, R.M., V.M. Arellano, A. Mendoza, and L. Reyes, 2011. Effects of reinjection on the chemical and isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) behavior of Los Azufres (Mexico) geothermal fluids, as indicated by 2010 data. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 35, 603-608.

Barragán Reyes, R.M., V.M. Arellano Gómez, A. Hernández, A. Aragón, A. Mendoza, and L. Reyes, 2013. Evaluación preliminar del proceso de reinyección en la zona sur del campo geotérmico Los Azufres, Mich. (1989-2011) con base en las concentraciones de Cl de los fluidos producidos y de inyección. *Geotermia*, Vol. 27, No. 1, 12-23.

Breiman, L., and J.H. Friedman, 1985. Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation. *Journal of American Statistical Association*, Vol. 80, 580-619.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A., R. Maya-González, and J.L. Quijano-León, 2010. Current status of geothermics in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia.

Horne, R.N., and P. Szucs, 2007. Inferring well-to-well connectivity using nonparametric regression on well histories. *Proceedings 32<sup>nd</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, CA.

Iglesias, E.R., M. Flores-Armenta, R.J. Torres, M. Ramírez-Montes, N. Reyes-Picasso, and L. Reyes-Delgado, 2011. Estudio con trazadores de líquido y vapor en el área Tejamaniles del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, Vol. 24, 38-49.

Korkmaz Basel, E.D., E. Juliusson, and R.N. Horne, 2011. A new look at well-to-well correlations using nonparametric, nonlinear regression. *Proceedings 36<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, CA.

Villacorte, J.D., R.C.M. Malate, and R.N. Horne, 2010. Application of nonparametric regression on well histories of geothermal production fields in the Philippines. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia.

(Figuras en páginas siguientes)

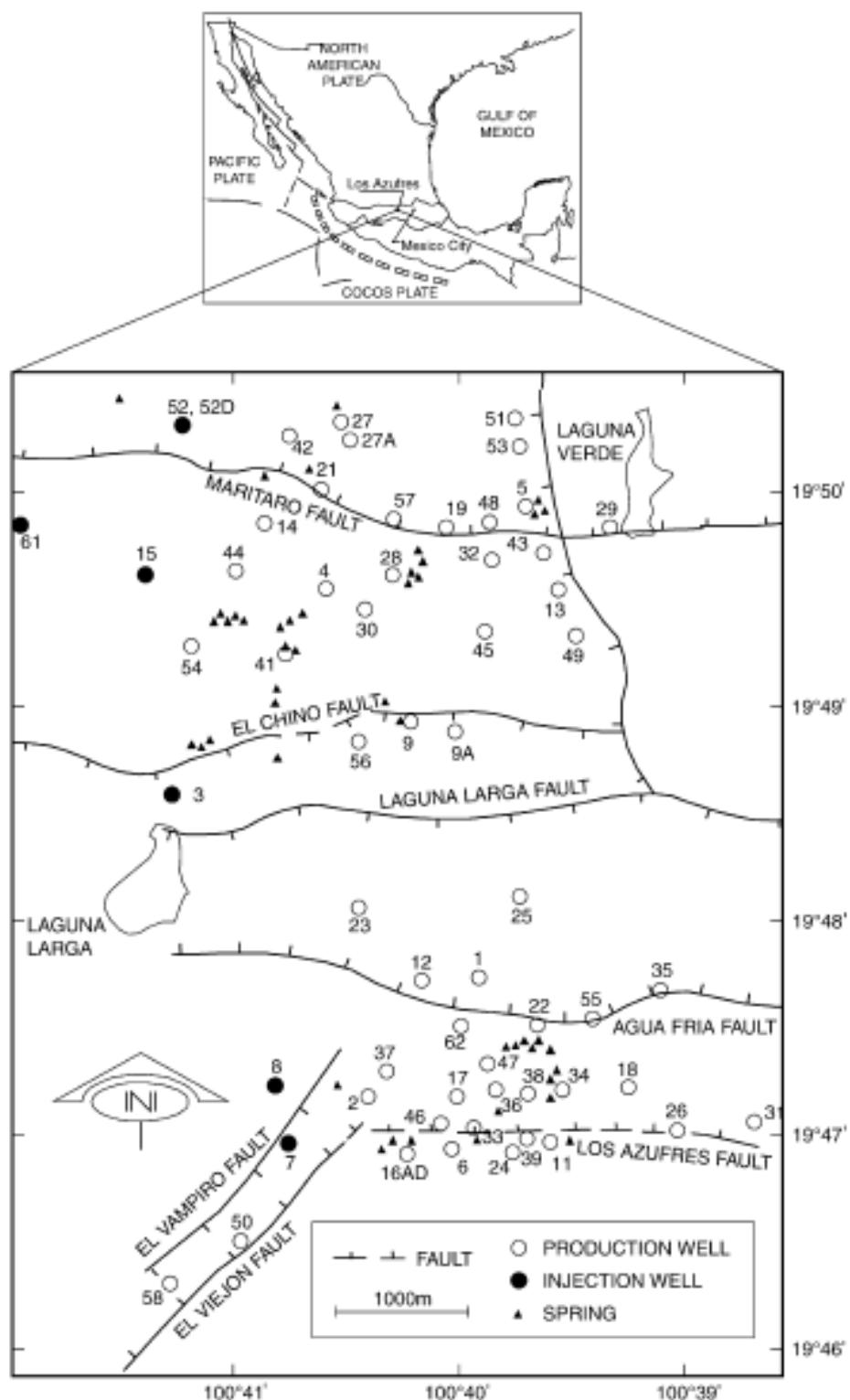


Figura 1. Ubicación del campo geotérmico de Los Azufres. Los pozos, sin el prefijo "Az-", se indican mediante números (tomado de Barragán et al., 2005).

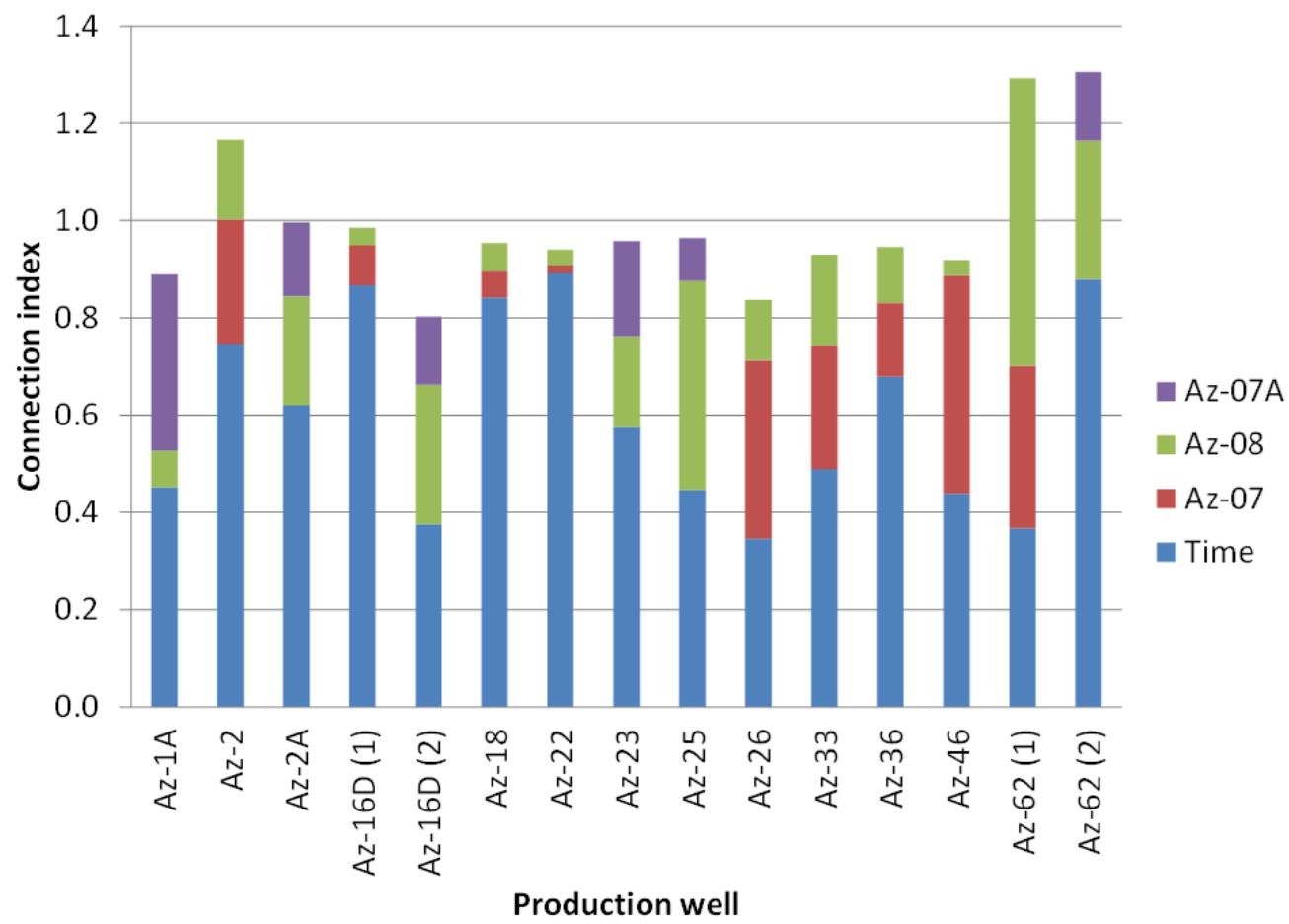


Figura 2. Índices de conexión entre pozos de inyección y de producción de mezcla de líquido – vapor en la zona sur del campo de Los Azufres calculados por el algoritmo ACE utilizando gastos de inyección y concentraciones de cloruro.

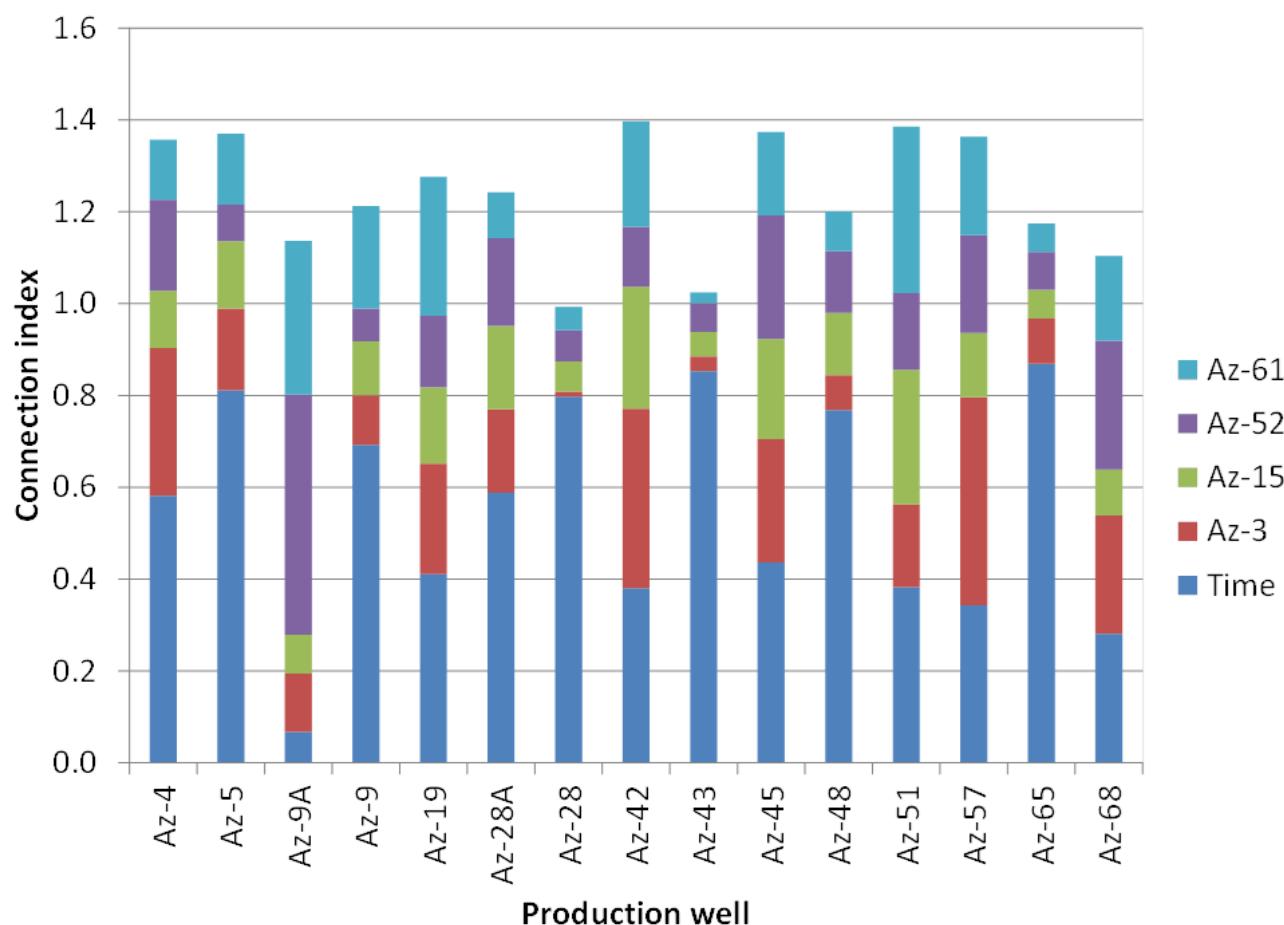


Figura 3. Índices de conexión entre pozos de inyección y de producción de mezcla de líquido – vapor en la zona norte del campo de Los Azufres, calculada por el algoritmo ACE utilizando gastos de inyección y concentraciones de cloruro.

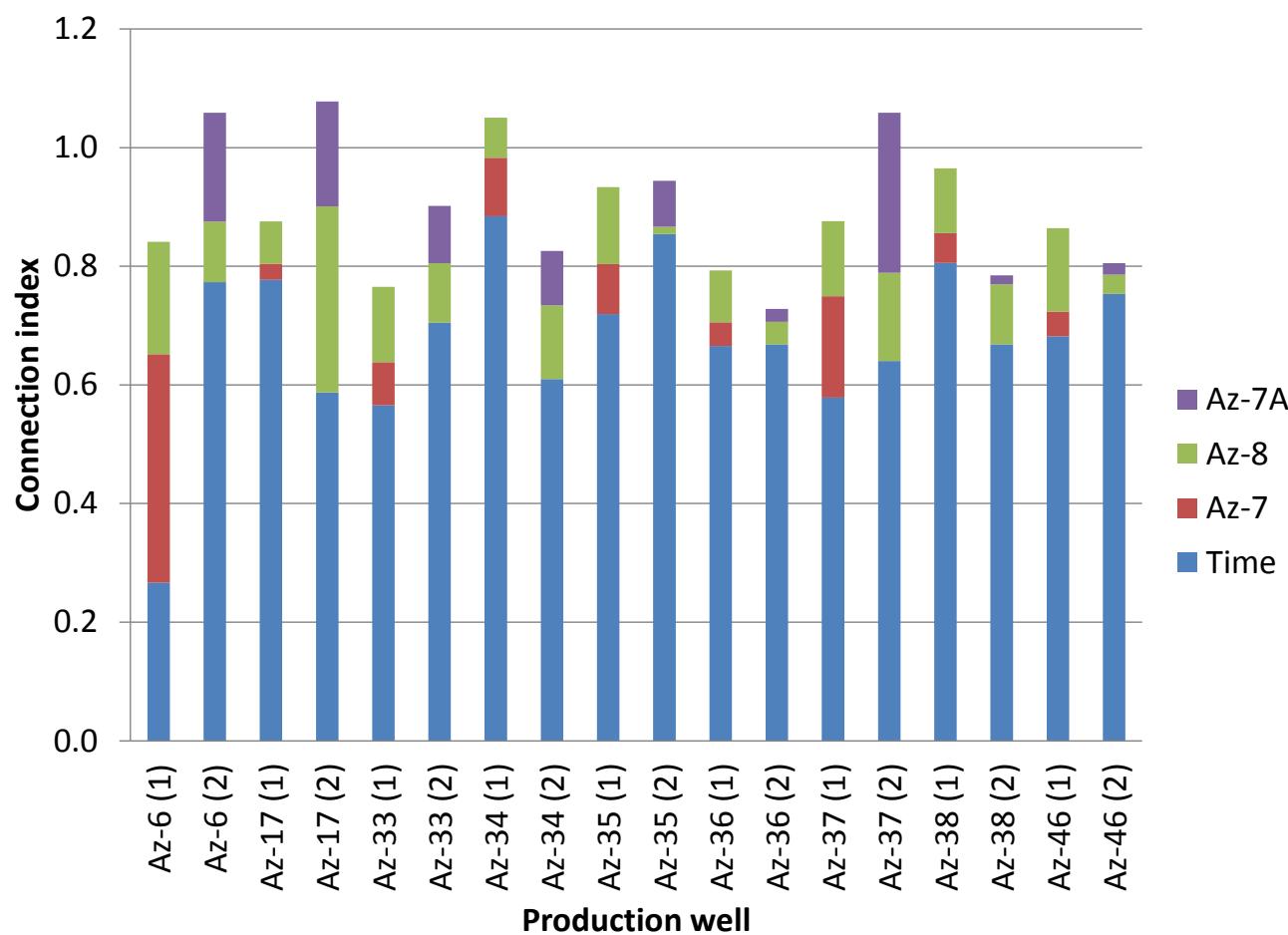


Figura 4. Índices de conexión entre pozos de inyección y de producción de vapor en la zona sur del campo de Los Azufres, calculados por el algoritmo ACE usando gastos de inyección y presiones de fondo de pozo.