

## Estudio con trazadores en la zona centro-sur del campo geotérmico de Los Humeros, Pue.

**Eduardo Iglesias R.<sup>1</sup>, Miguel Ramírez M.<sup>2</sup>, Irma Cruz Grajales<sup>2</sup>, Rodolfo J. Torres R.<sup>1</sup> y Neftalí Reyes P.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia. Correo: [iglesias@iie.org.mx](mailto:iglesias@iie.org.mx)

<sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.

### Resumen

En el campo geotérmico de Los Humeros, Pue., se construyen actualmente dos unidades adicionales de 25 MW cada una. Cuando entren en operación se incrementará la extracción de los fluidos del yacimiento y la inyección de salmuera en aproximadamente 250%. Ante ello es necesario determinar la conexión hidráulica entre los pozos inyectores y los productores, a fin de establecer los esquemas de explotación del fluido geotérmico que permitan un desarrollo sustentable a corto y mediano plazo, asegurando la recarga del yacimiento, sin producir interferencia térmica en los pozos productores. Para determinar los posibles efectos de esta inyección sobre el comportamiento del yacimiento (recarga, mantenimiento de la presión, interferencia térmica, entre otros) la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE encargó a la Gerencia de Geotermia del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) la realización de un estudio para investigar la conexión hidráulica entre los pozos inyectores y los productores de la zona centro y sur del campo. En este estudio se inyectó un trazador en el pozo H-13D para rastrear la fase líquida. El trazador fue detectado en los nueve pozos productores monitoreados seleccionados por CFE para este estudio (H-01D, H-06, H-07, H-12, H-19, H-37D, H-39, H-41 y H-42), determinándose que existe comunicación hidráulica entre el pozo inyector y todos los pozos productores designados. El porcentaje de trazador recuperado en todos los pozos es pequeño, equivalente al 0.0537%. Esta pequeña recuperación del trazador en los pozos monitoreados implica que, en las condiciones de inyección registradas durante el presente estudio, el riesgo de interferencia térmica en los pozos productores monitoreados es despreciable. Es muy probable que parte del trazador haya sido producido por pozos no monitoreados en este estudio, como lo sugiere la aparición del mismo en los pozos H-19 y H-37D situados en las zonas centro y norte del campo, a 2,334 y 4,125 m respectivamente del pozo inyector. Pero incluso así, el resultado sugiere que una fracción muy importante de la salmuera inyectada se distribuye ampliamente en el yacimiento. Una posibilidad es que una fracción importante del fluido inyectado, relativamente frío, y por lo tanto más denso, fluya hacia las profundidades del yacimiento en la cercanía del pozo inyector, mientras que una fracción menor del mismo se canalice a través de la red de fracturas, o a través de contactos entre formaciones, hacia los pozos productores. Este escenario, de ser correcto, indicaría que la inyección en el pozo H-13D recarga mayormente el yacimiento a profundidad, contribuyendo a prolongar la vida útil del mismo. Los cortos tiempos de arribo del trazador a los pozos productores sugieren que existe una distribución arealmente amplia de permeabilidad horizontal en la zona considerada en este estudio. Esta distribución de permeabilidad no parece estar asociada con la distribución conocida de fallas en Los Humeros, sino que podría relacionarse más bien con los contactos entre las formaciones geológicas.

**Palabras clave:** Los Humeros, trazadores químicos, pozos productores, pozos inyectores, conexión entre pozos.

### 1. Introducción

En el campo geotérmico de Los Humeros, Pue., se construyen actualmente dos unidades adicionales de 25 MW cada una. Cuando entren en operación se incrementará la extracción de los fluidos del yacimiento y la inyección de salmuera en aproximadamente 250%. Ante ello es necesario determinar la conexión hidráulica entre los pozos inyectores y los productores, a fin de establecer los esquemas de explotación del fluido geotérmico que permitan un desarrollo sustentable a corto y mediano plazo, asegurando la recarga del yacimiento, sin producir interferencia térmica en los pozos productores. Para determinar los posibles efectos de esta inyección sobre el comportamiento del yacimiento (recarga, mantenimiento de la presión, interferencia térmica, entre otros) la Gerencia de Proyectos Geotermoelectríficos (GPG) de la CFE encargó a la gerencia de Geotermia del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) la realización de un estudio para investigar la conexión hidráulica entre los pozos inyectores y los productores de la zona centro y sur del campo.

En este estudio se inyectó un trazador de fase líquida en el pozo inyector H-13D y se monitoreó su aparición en los pozos productores H-01D, H-06, H-07, H-12, H-19, H-37D, H-39, H-41 y H-42, que fueron designados por CFE.

Los objetivos de este estudio son: (1) determinar la conexión hidráulica existente en el yacimiento entre el pozo inyector y los pozos productores designados, y (2) estimar qué fracción del agua geotérmica inyectada se recupera en los nueve pozos productores designados.

## 2. Materiales y método

La Fig. 1 (ver figuras al final del texto) ilustra la zona del campo geotérmico Los Humeros en la que se desarrolló este estudio.

En la Fig. 2 se presenta una sección vertical entre el pozo H-37D y el pozo H-12 (Fig. 1), en la que se aprecian las relaciones espaciales entre los pozos designados por CFE para este estudio.

Pozo	Vapor (t/h)	Aqua (t/h)	Distancia (m)
H-01D	10	8	748
H-06	49	5	1,523
H-07	47	4	1,509
H-12	60	4	2,050
H-19	24	2	2,334
H-37	33	21	4,125
H-39	40	7	1,579
H-41	14	1	1,724
H-42	12	2	1,391

Tabla 1. Producción media de los pozos y distancias al pozo inyector.

Las distancias de los pozos productores al inyector, y las producciones medias reportadas por CFE se presentan en la Tabla 1.

Como trazador de fase líquida se utilizó el compuesto 2,6 disulfonato de naftaleno (2,6 dsn). El 2,6 dsn es un compuesto ecológicamente benigno. Es un trazador conservativo y estable térmicamente a 300°C (Rose et al. 2001; 2002). Se analiza por cromatografía de líquidos (HPLC), por fluorescencia UV. El límite de detección con este método de análisis es aproximadamente 100 ppt (100 x 10<sup>-12</sup>).

La interpretación de los datos producidos por el estudio se hace a partir de: (i) curvas de residencia, que registran las concentraciones de los trazadores detectadas en los pozos en función del tiempo desde la inyección, y (ii) de curvas que registran el porcentaje de trazador inyectado recuperado en cada pozo.

La masa de trazador recuperada en el pozo  $j$  se computa mediante

$$m_j(t) = \int_0^t W_j(s) c_j(s) ds \quad (1)$$

donde  $m_j(t)$  es la masa de trazador recuperada en el pozo  $j$  desde la inyección del trazador ( $t = 0$ ) hasta el tiempo  $t$ ,  $W_j(t)$  es el gasto másico instantáneo del pozo  $j$ , y  $c_j(t)$  es la concentración instantánea del trazador en el pozo  $j$ .

La masa total de trazador recuperada en todos los pozos de observación es por lo tanto

$$m_R = \sum_j m_j \quad (2)$$

El 20 de julio de 2010 se inyectaron 300 kg de 2,6 nds disueltos en 1,500 l de salmuera de inyección, en el pozo H-13D. La duración de la inyección del trazador fue 18 minutos. Cuatro horas después de terminada la inyección del trazador comenzó el muestreo de los pozos participantes en el estudio. El muestreo incluyó al pozo inyector H-13D, para determinar si se recircula el trazador y corregir los resultados por ese efecto. Siguiendo el procedimiento estándar en este tipo de estudios, los pozos fueron muestreados con frecuencia decreciente en el tiempo.

Durante un estudio previo en este campo geotérmico (Iglesias et al., 2007) se observó que las curvas de residencia de los trazadores utilizados presentaban patrones inusuales. Sospechamos que dichos patrones eran causados por la presencia de múltiples zonas de alimentación, de diferentes entalpías, en los pozos. En este estudio medimos la conductividad eléctrica de las muestras líquidas para investigar esa hipótesis.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Conectividad hidráulica en el yacimiento

Las Figs. 3-5 presentan las curvas de residencia y recuperación de trazador para cada pozo productor. Como se puede apreciar en las figuras, el período de muestreo cubrió 272 días. En cada pozo se tomaron 80 muestras.

Las curvas de residencia de los pozos productores fueron corregidas por la recirculación del trazador evidenciada por la detección del mismo en el pozo inyector H-13D (Fig. 6). La corrección se efectuó mediante el algoritmo de deconvolución desarrollado por Shook y Forsmann (2005). En la aplicación de este algoritmo se approximó la inyección del trazador por un pulso instantáneo, considerando que la duración de la misma, 18 minutos, es mucho menor que el período de observación (272 días). Para todos los pozos la corrección por recirculación del trazador resultó despreciable en el período estudiado.

Como se observa en las Figs. 3-5 el trazador fue detectado en todos los pozos productores participantes. Dicho resultado demostró que la inyección en el pozo H-13D recarga todos los pozos monitoreados. Se cumplió así el primer objetivo de este estudio.

Los cortos tiempos de arribo del trazador a los pozos productores sugieren que existe una distribución arealmente amplia de permeabilidad horizontal en la zona considerada en este estudio. Esta distribución de permeabilidad no parece estar fuertemente asociada con la distribución conocida de fallas en Los Humeros; podría relacionarse más bien con contactos entre las formaciones geológicas.

### *3.2 Porcentaje de trazador recuperado en los pozos productores*

Los porcentajes de masa de trazador recuperada en los pozos durante el período de observación se computaron numéricamente a partir de la ecuación (1) y de la masa de trazador inyectado. Dichos resultados se presentan en las Figs. 3-5 y en la Tabla 2.

Pozo	Trazador recuperado (%)
H-01D	0.0402
H-06	0.0017
H-07	0.0014
H-12	0.0021
H-19	0.0008
H-37	0.0006
H-39	0.0026
H-41	0.0034
H-42	0.0010
<b>Total</b>	<b>0.0537</b>

*Tabla 2. Porcentajes de trazador recuperado durante el período estudiado.*

En el pozo H-01D, el productor más cercano al pozo inyector, la curva de recuperación alcanzó una meseta al final del período observado (Fig. 3), lo que sugiere que, posiblemente, el arribo del trazador se habría completado en este pozo.

En el resto de los pozos productores las curvas de recuperación de trazador crecieron monótonamente durante el período registrado (Figs. 3-5), indicando que el trazador continuaba arribando a los mismos cuando se concluyó el muestreo. Casos en los que se suspende el muestreo antes de que se complete el arribo del trazador a todos los pozos, como el presente, ocurren con frecuencia. En los mismos se puede intentar estimar la masa de trazador que se recuperaría en cada pozo extrapolando el comportamiento del extremo tardío de la curva de residencia (e.g., Shook y Forsmann, 2005). Desafortunadamente, en este caso no fue posible aplicar este recurso debido a los patrones inusuales que presentan las curvas de residencia: la sucesión de cumbres y valles de estas curvas en el período observado no permiten discernir las tendencias tardías de las mismas (Figs. 3-5). Por lo mismo, los porcentajes de recuperación computados hasta 272 días de observación representan sólo una cota inferior de los porcentajes de recuperación esperados para estos pozos.

Como puede verse en la Tabla 2, el porcentaje total de trazador recuperado (0.0537%) durante el período de observación es muy pequeño. Sin embargo, debido a que el trazador continuaba arribando por lo menos a ocho de los nueve pozos observados, este porcentaje de recuperación total es menor que el esperado.

Cabe mencionar que el porcentaje total de trazador recuperado (0.0537%) registrado es consistente con un resultado previo (0.131%) obtenido en la zona Norte del mismo campo (Iglesias et al., 2007) sobre un área menor y un período más corto (205 días). En aquel caso el trazador de fase líquida completó su arribo en 7 de los 9 pozos observados. En este caso el trazador no completó su arribo en ocho de los nueve pozos observados.

Aunque existe incertidumbre acerca del porcentaje total de trazador recuperado, podemos especular que, dado que se trata del mismo campo, la recuperación esperada sería del mismo orden de magnitud o tal vez hasta uno o dos órdenes de magnitud mayor que el encontrado en la zona Norte en el estudio previo citado. En cualquiera de estos casos, la magnitud de la recuperación indicaría que, debido a su mayor densidad, la mayor parte de la salmuera inyectada fluye a zonas profundas del yacimiento

recargándolo y extendiendo su vida económica. Es muy probable que parte del trazador haya sido producido por pozos no monitoreados en este estudio, como lo sugiere la aparición del mismo en los pozos H-19 y H-37D situados en las zonas centro y norte del campo, a 2,334 y 4,125 m respectivamente del pozo inyector.

Adicionalmente, considerando los bajísimos porcentajes de recuperación acumulados durante los 272 días de observación y la especulación del párrafo precedente, es de esperar que no se presentará interferencia térmica apreciable en los pozos monitoreados debida a la inyección de salmuera en el pozo H-13D a las condiciones prevalecientes en este estudio.

### 3.3 Causas de los patrones inusuales

Debido a la importancia que tiene estimar confiablemente la fracción de trazador que se recuperará en cada pozo, que estima la fracción de agua inyectada que eventualmente recargará los pozos productores, en este estudio hemos investigado las causas que generan los patrones inusuales que presentan las curvas de residencia de trazadores de líquido en los pozos de Los Humeros. Comenzamos por notar que durante el muestreo de los pozos, tanto en el estudio previo (Iglesias et. al., 2007) como en el presente, se comprobó que las descargas de los mismos presentan variaciones de corto plazo. Recordamos también que pozos de alta entalpía con dos o más zonas de alimentación de diferentes entalpías tienden a presentar dicho comportamiento (e.g., Grant et al., 1982). En tercer lugar, medimos la conductividad eléctrica de las muestras líquidas para investigar las causas de los patrones inusuales mencionados. Los resultados de mediciones se presentan como histogramas en las Figs. 3-5 y se resumen en la Tabla 3. Las conductividades eléctricas medidas en cada pozo presentaron dispersiones importantes, mucho mayores que las atribuibles a errores de medición.

Comparando los valores medios de conductividad eléctrica medida en cada pozo con el valor medio de la fracción de agua en la descarga, calculada a partir los datos de la Tabla 1, comprobamos que correlacionan bien (Fig. 7). Como la conductividad eléctrica de las muestras refleja la concentración de iones en las mismas, inferimos que las descargas de mayor entalpía presentan menor conductividad eléctrica probablemente por dilución con condensado de vapor. Los histogramas en las Figs. 3-5 y los correspondientes valores en la Tabla 3 indican que todos los pozos estudiados tienen al menos dos zonas de alimentación con diferentes entalpías. Inferimos por lo tanto que la causa de las variaciones de conductividad eléctrica observadas es la existencia de múltiples zonas de alimentación de diferentes entalpías en los pozos.

La correlación de la Fig. 7 revela que las variaciones de la conductividad eléctrica de las muestras indican variaciones en la fracción de agua en la correspondiente descarga. Por lo tanto, la concentración del trazador en la descarga es modulada por la fracción de agua instantánea en la misma.

Pozo	Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )			
	Max.	Min.	Media	Desv. Estándar
H-01D	1,062.0	370.0	828.6	156.92
H-06	597.0	60.5	236.8	159.00
H-07	840.0	30.6	253.8	209.21
H-12	193.0	101.3	137.7	18.86
H-19	639.0	112.8	365.7	186.87
H-37	1,772.0	893.0	1,366.8	222.06
H-39	847.0	686.0	787.0	29.63
H-41	1,082.0	85.0	196.7	129.74
H-42	712.0	65.7	308.7	202.54

Tabla 3. Mediciones de conductividad eléctrica.

Esta modulación se superpone con la producida por el arribo del trazador a la interface entre la(s) fractura(s) que produce(n) líquido en el pozo y la pared del mismo. Y, si existe más de una fractura que aporte líquido al pozo, la(s) mezcla(s) resultantes modulan también la concentración del trazador en la descarga líquida muestreada. Concluimos que esta complicada superposición de modulaciones explica los patrones inusuales observados en las curvas de residencia del trazador de fase líquida en los pozos de Los Humeros. Será necesario tener en cuenta estas características de los pozos de Los Humeros en el diseño de futuros estudios con trazadores.

#### **4. Sumario y conclusiones**

Se inyectó un trazador de fase líquida en el pozo H-13D y se monitoreó durante 272 días la concentración del mismo en los pozos H-01D, H-06, H-07, H-12, H-19, H-37D, H-39, H-41 y H-42, que fueron designados por CFE.

El trazador fue detectado en todos los pozos productores observados, revelando que existe conexión hidráulica en el yacimiento entre el pozo inyector y los productores monitoreados. De este modo, se comprobó que la salmuera inyectada en el pozo H-13D recarga los nueve pozos productores estudiados.

Los cortos tiempos de arribo del trazador a los pozos productores sugieren que existe una distribución arealmente amplia de permeabilidad horizontal en la zona considerada en este estudio. Esta distribución de permeabilidad no parece estar fuertemente asociada con la distribución conocida de fallas en Los Humeros; podría relacionarse más bien con contactos entre las formaciones geológicas.

Con la posible excepción del pozo H-01D, el trazador no completó el arribo a los pozos observados. Esto y los patrones inusuales que presentan las curvas de recuperación introdujeron incertidumbre acerca del porcentaje total de trazador esperado en cada pozo y en el de su suma. Sin embargo, especulando que el porcentaje de recuperación esperado fuera similar o hasta dos órdenes de magnitud mayor que el observado en un estudio previo en la parte Norte del campo, la magnitud de la recuperación indicaría que la mayor parte de la salmuera inyectada fluye a zonas profundas del yacimiento recargándolo y extendiendo su vida económica.

Adicionalmente, considerando los bajísimos porcentajes de recuperación acumulados durante los 272 días de observación y la especulación del párrafo precedente, es de esperar que no se presentará interferencia térmica apreciable en los pozos monitoreados debida a la inyección de salmuera en el pozo H-13D a las condiciones prevalecientes en este estudio.

Se investigaron las causas que generan los patrones inusuales de las curvas de recuperación del trazador. Como parte de esta investigación se midieron *in situ* las conductividades eléctricas de las muestras. Comparando los valores medios de conductividad eléctrica medida en cada pozo con el valor medio de la fracción de agua en la descarga se determinó que la conductividad correlaciona linealmente con la fracción de agua en la descarga. Considerando conjuntamente las variaciones de corto plazo observadas en los gastos de los pozos, las variaciones de la fracción de agua en la descarga reveladas por las variaciones de conductividad eléctrica de las muestras y las distribuciones estadísticas de la conductividad eléctrica medida en las muestras de líquido, se concluyó que la causa de los patrones inusuales en las curvas de residencia del trazador es la existencia de al menos dos zonas de alimentación con entalpias diferentes, en cada pozo productor. Será necesario tener en cuenta estas características de los pozos de Los Humeros en el diseño de futuros estudios con trazadores.

## Referencias

- Iglesias, E.R., R.J. Torres, and N. Reyes-Picasso, 2007. Estudio con trazadores en la zona Norte del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla – Primera etapa. Informe IIE/11/13360/I-02/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 105 pp. Inédito.
- Rose, P.E., W.R. Benoit and P.M. Kilbourne, 2001. The application of polyaromatic sulfonates as tracers in geothermal reservoirs: *Geothermics* Vol. 30, pp. 617-640.
- Rose, P.E., V. Capuno, A. Peh, P.M. Kilbourne and C. Kasteler, 2002. The use of naphthalene sulfonates as tracers in high temperature geothermal systems: *Proceedings of the 23rd Annual PNOC-EDC Geothermal Conference*, pp. 53-58.
- Shook, G.M. and J.H. Forsmann, 2005. *Tracer interpretation using temporal moments on a spreadsheet*. Report INL/EXT-05-00400 Revision 1, Idaho National Laboratory, Idaho, U.S.A.

## Figuras

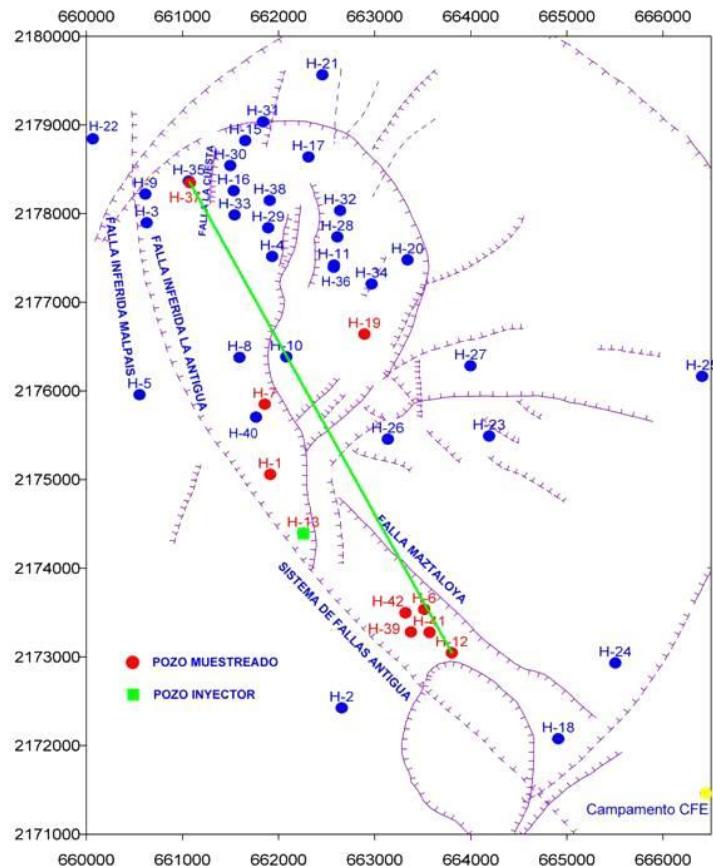


Fig. 1. Localización de los pozos

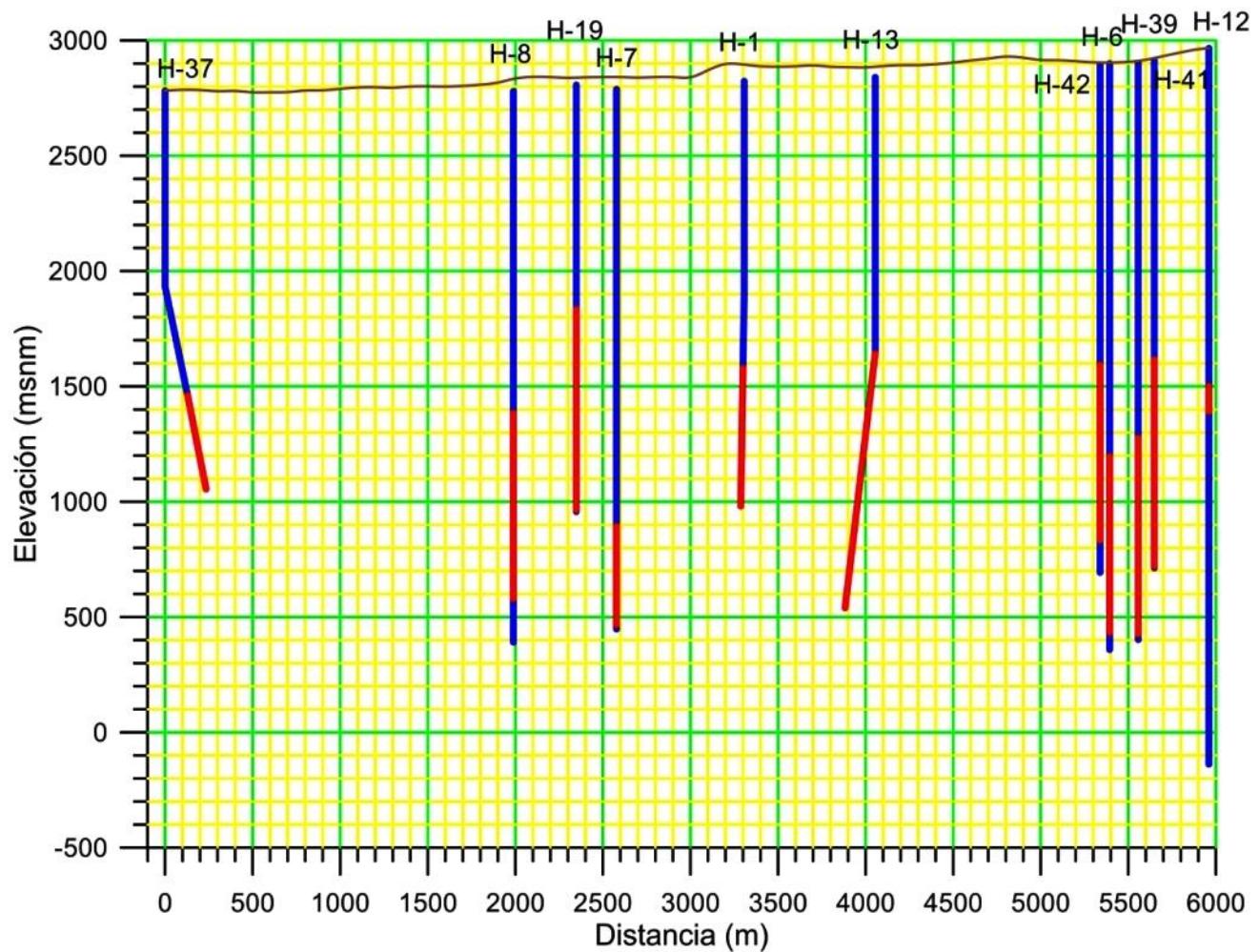


Fig. 2. Relaciones espaciales entre los pozos.

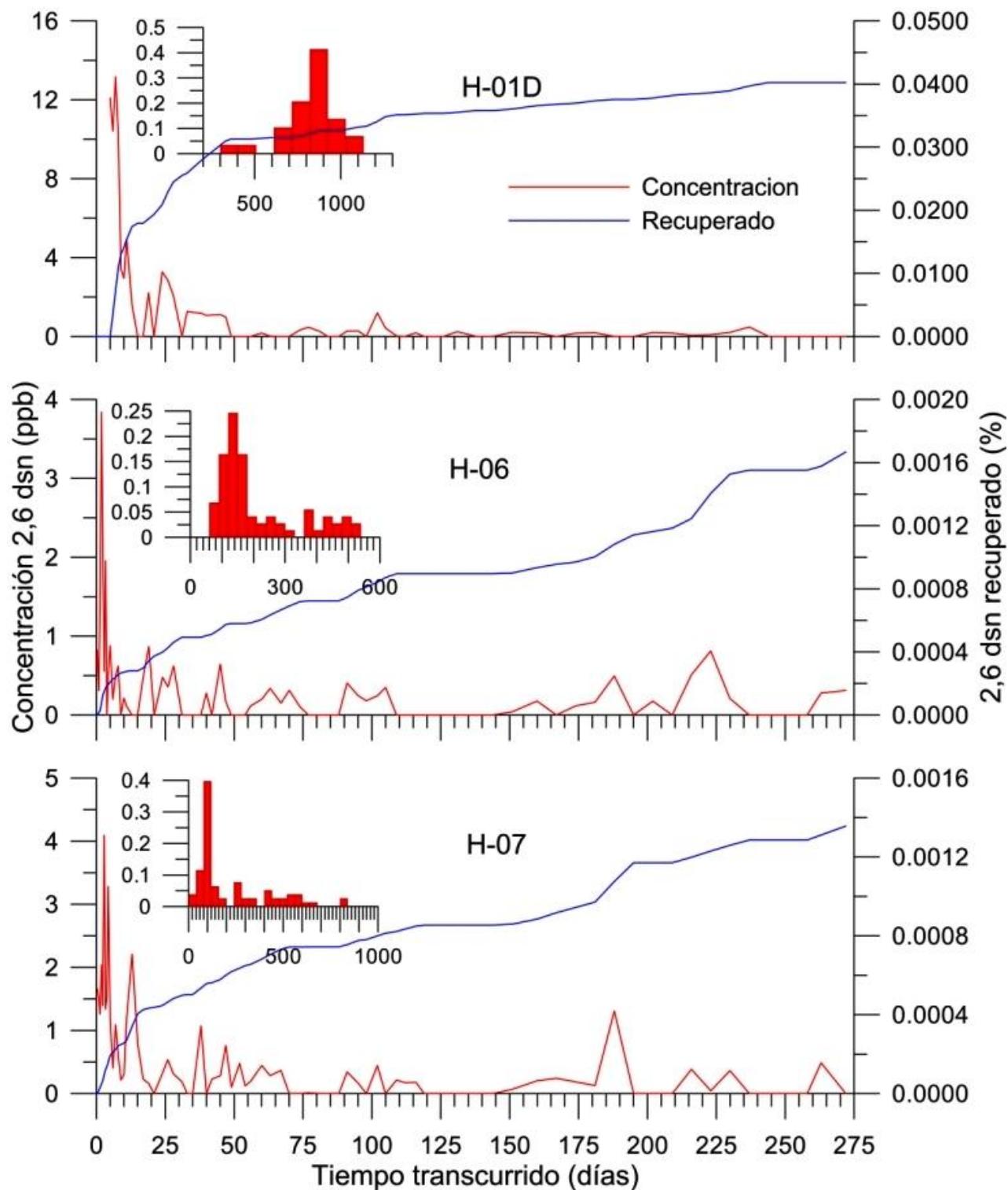


Fig. 3. Curvas de residencia y recuperación de trazador de los pozos H-01D, H-06 y H-07, se incluyen los histogramas de conductividad eléctrica registrados.

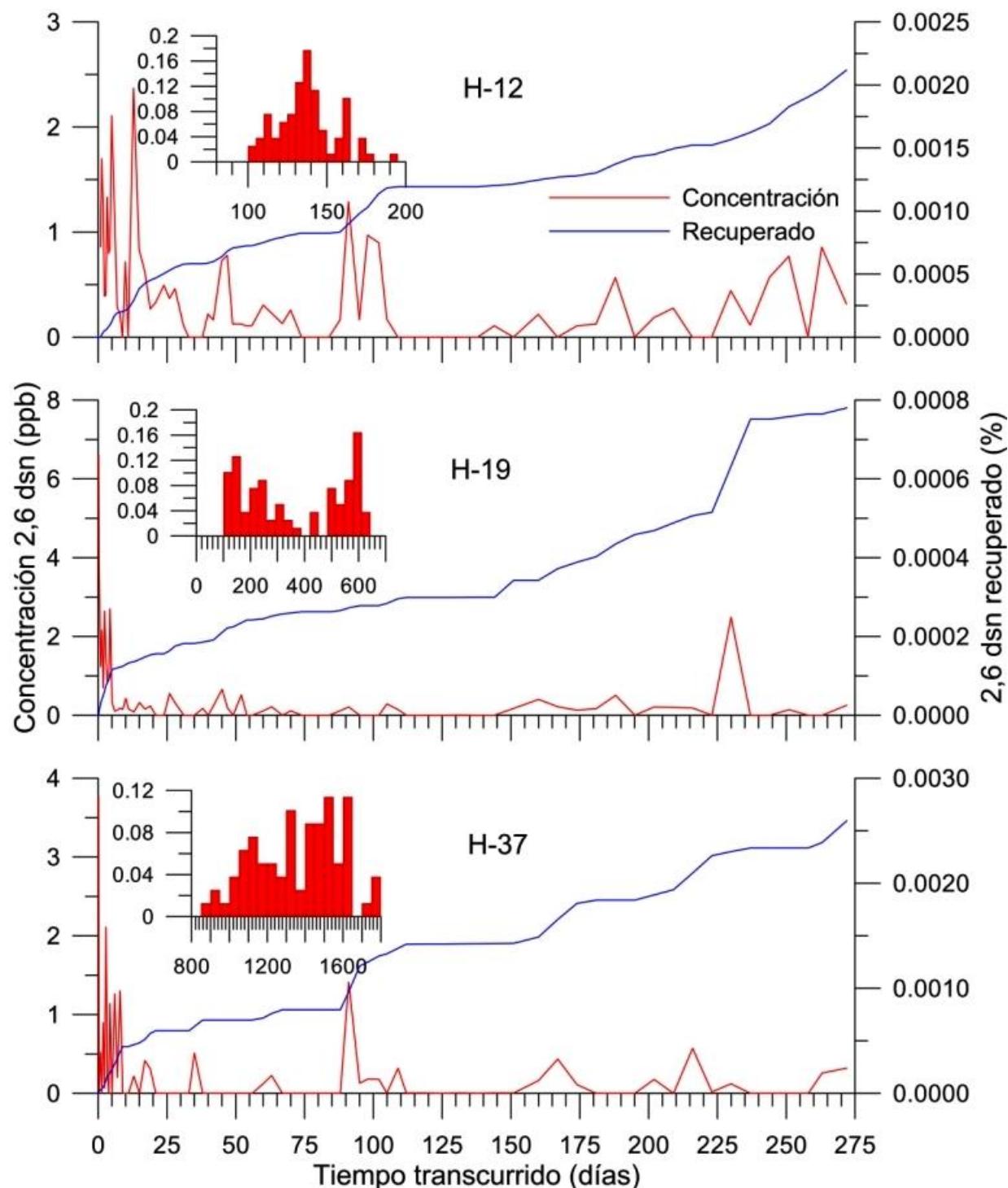


Fig. 4. Curvas de residencia y recuperación de trazador de los pozos H-12, H-19 y H-37D, se incluyen los histogramas de conductividad eléctrica registrados.

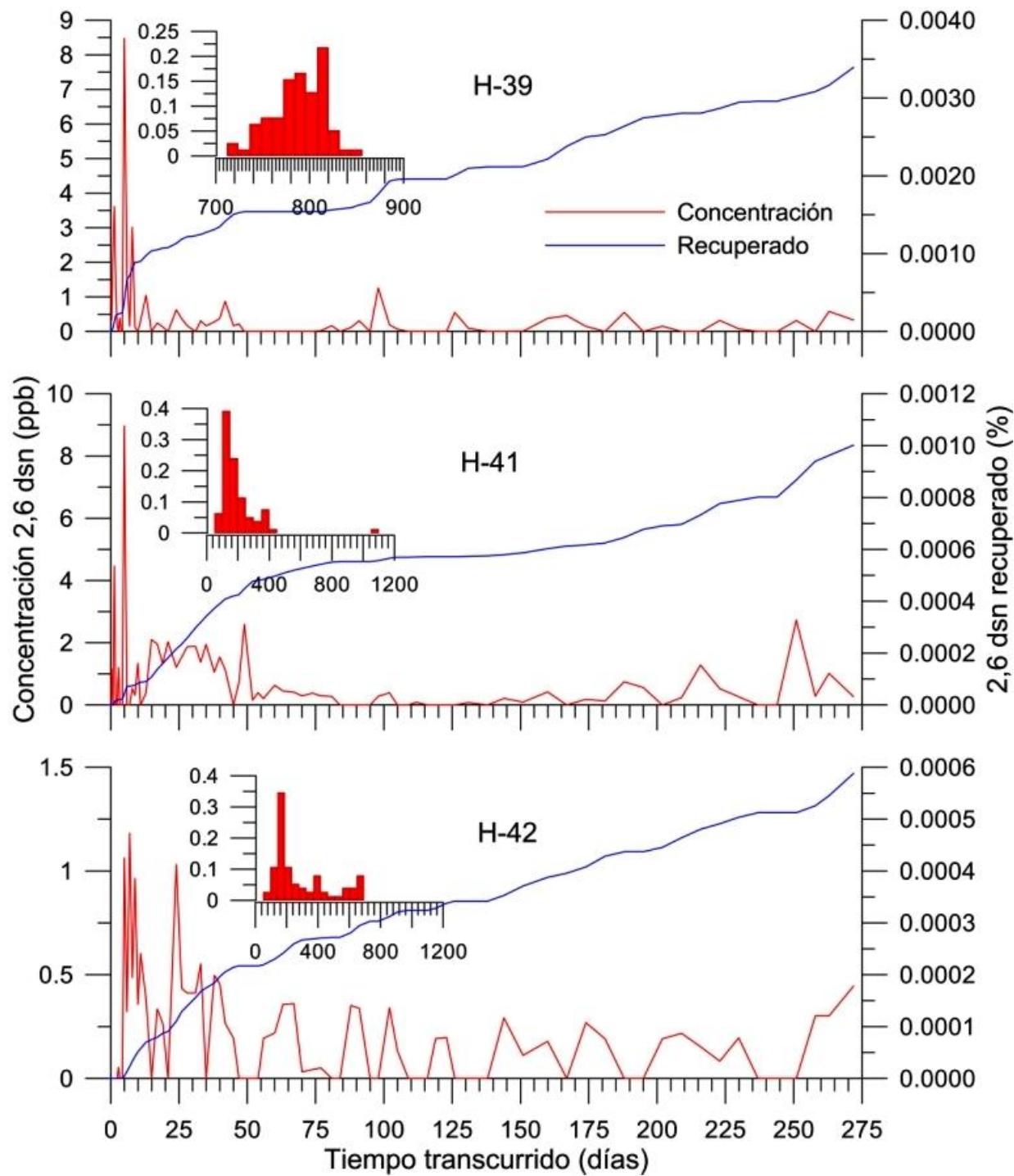


Fig. 5. Curvas de residencia y recuperación de trazador de los pozos H-39, H-41 y H-42, se incluyen los histogramas de conductividad eléctrica registrados.

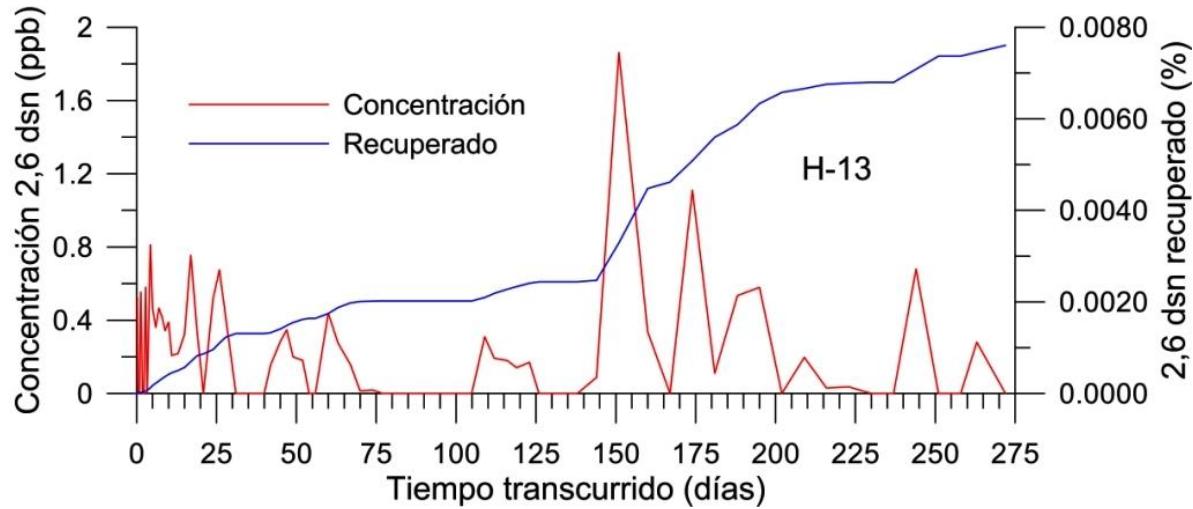


Fig. 6. Recirculación del trazador en el pozo inyector H-13D.

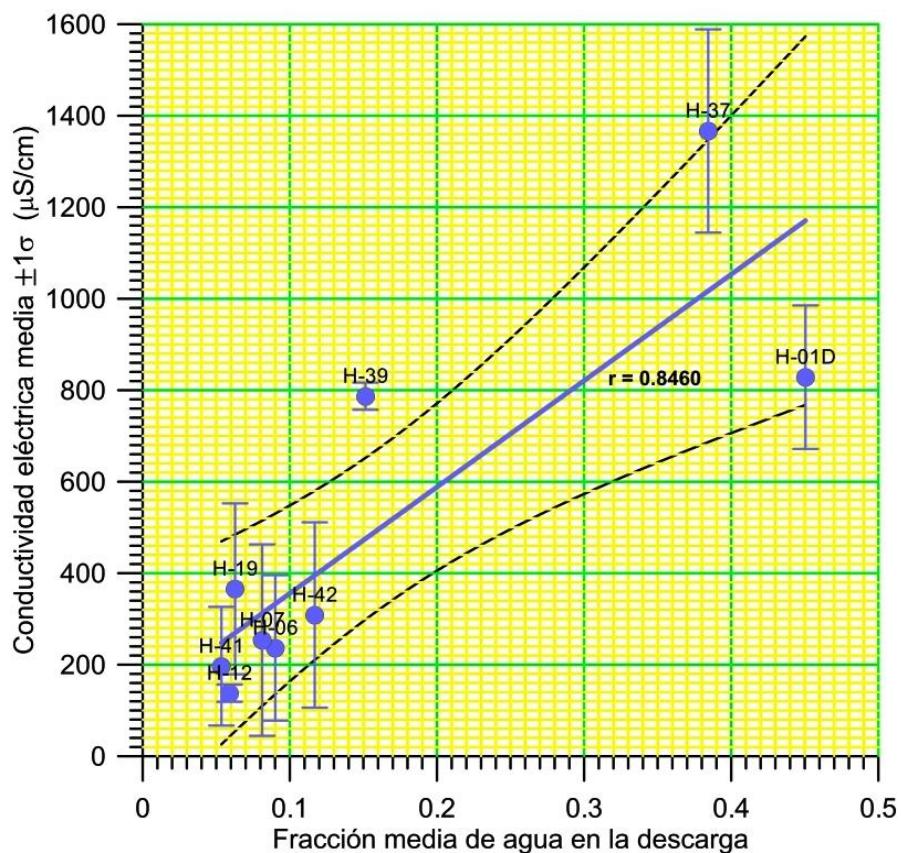


Fig. 7. Correlación de la conductividad eléctrica de las muestras con la fracción de agua en la descarga. Las líneas punteadas indican el intervalo de confianza de 95%.