

## **NOTICE CONCERNING COPYRIGHT RESTRICTIONS**

This document may contain copyrighted materials. These materials have been made available for use in research, teaching, and private study, but may not be used for any commercial purpose. Users may not otherwise copy, reproduce, retransmit, distribute, publish, commercially exploit or otherwise transfer any material.

The copyright law of the United States (Title 17, United States Code) governs the making of photocopies or other reproductions of copyrighted material.

Under certain conditions specified in the law, libraries and archives are authorized to furnish a photocopy or other reproduction. One of these specific conditions is that the photocopy or reproduction is not to be "used for any purpose other than private study, scholarship, or research." If a user makes a request for, or later uses, a photocopy or reproduction for purposes in excess of "fair use," that user may be liable for copyright infringement.

This institution reserves the right to refuse to accept a copying order if, in its judgment, fulfillment of the order would involve violation of copyright law.

## Pruebas con Trazadores en Los Azufres

Héctor G. Puente\*, Roland N. Horne\*\*

\*Comisión Federal de Electricidad  
\*\*Universidad de Stanford

### 1. Resumen

Hasta Febrero de 1987, cerca de 8 millones de toneladas de agua han sido inyectadas en Los Azufres. Principalmente en los pozos Az-40, Az-15 y Az-7. Seis pruebas con trazadores han sido desarrolladas hasta Julio de 1987, sin que en ninguna de éstas haya sido recuperado el trazador. Hemos revisado la metodología empleada en estas pruebas y las implicaciones que tiene el hecho de no obtener respuesta en las mismas. Basado en los resultados, aparentemente la reinyección en los pozos Az-7 y Az-8 no afecta el comportamiento del yacimiento. Como los tiempos de retorno de los trazadores parecen ser largos, el seguir insistiendo en este tipo de pruebas, se considera inútil. El registro a largo plazo de elementos químicos, contenidos en el líquido y el vapor (tales como el Cloro y el Nitrógeno) podrían identificar a largo plazo, el transporte de los fluidos inyectados en el yacimiento.

### 2. Reinyección en Los Azufres

La reinyección en Los Azufres se inició en el año de 1982, sin que hasta el momento se haya tenido dificultad alguna para reinyectar el agua separada en las cinco Unidades a boca de pozo. La tabla 1 sintetiza las cantidades de agua separada reinyectada, hasta Febrero de 1987. En suma, cerca de 8 millones de toneladas de agua han sido inyectadas hasta la fecha señalada. Los principales sitios de reinyección han sido los pozos Az-40 y Az-15 en la Zona Norte, y en los pozos Az-7 y Az-8 en la Zona Sur del campo. Recientemente, el pozo Az-31 ha sido adicionado como pozo reinector en la Zona Sur. El pozo Az-1 ha sido propuesto como un sitio potencial de reinyección, debido a su cercanía con la Central Geotermoeléctrica. Actualmente el pozo Az-40 acepta la mayor parte del fluido de la Zona Norte, mientras que el pozo Az-7 capta la mayor parte del fluido de la Zona Sur.

Tabla 1: Resumen de la reinyección en Los Azufres (hasta Feb. 1987)

Los requerimientos totales de reinyección en Los Azufres, serán del orden de las 700 ton/hr. Solo el pozo Az-7 puede aceptar, al menos, 425 ton/hr sin que el nivel del espejo de agua suba mas de 10 m (sobre un nivel estático de 450 m de profundidad). No ha sido demostrado que el pozo Az-7 puede aceptar mas de esta cantidad (ya que solo se disponen de 425 ton/hr para probarlo), pero es altamente probable que el pozo Az-7 pudiera aceptar la totalidad de las 700 ton/hr

requeridas. Se ha probado que el pozo Az-8 puede aceptar al menos 225 ton/hr, de esta forma, con estos dos pozos se dispone de capacidad suficiente de reinyección para generar 50 MWe.

No han sido detectados problemas de incrustación en los pozos de inyección, sin embargo en el pozo Az-40 se han encontrado evidencias de corrosión del casing, debido a la disolución de productos ácidos en la Laguna Verde.

### 3. Pruebas con Trazadores

Un total de seis pruebas con trazadores han sido desarrolladas en Los Azufres (ver tabla 2). En la primera de éstas, 1000 Kg de Ioduro de Potasio fueron utilizados, las restantes cinco pruebas se usó Iridio radioactivo 192. Todas estas pruebas fueron del tipo pozo-a-pozo. En dos de estas pruebas, se mantuvo la inyección en el pozo, un breve período posterior a la incorporación del trazador, por lo que la probabilidad del retorno del trazador para ser detectado, disminuye, como de hecho posteriormente se comprobó. En las restantes cuatro pruebas, en donde la inyección fué continua, el trazador tampoco fué detectado incluso después de 2 o 3 meses de registro.

Tabla 2: Pruebas con trazadores en Los Azufres

A continuación se describen cada una de las seis pruebas en detalle.

La primera prueba fué conducida por personal del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en colaboración con la Universidad de Stanford California. En este estudio, 1000 Kg de Ioduro de Potasio (KI) fueron inyectados en el pozo Az-8, el cual estuvo recibiendo el total del agua producida por el pozo Az-2. Los pozos Az-2 y Az-16 fueron registrados para detectar el regreso del Ioduro, o bien cambios en las concentraciones de Sodio, Potasio y Litio. El registro continuó por tres meses, sin que el trazador fuera detectado ni en el Az-2 ni en el Az-16.

Debido a la ausencia de resultados con el KI, se decidió posteriormente, la utilización de un elemento radioactivo como trazador, para este tipo de estudios. Se seleccionó el Iridio 192 con una vida media de 74 días, debido a las facilidades que presenta su adquisición en México, y por considerarsele poco riesgoso en su manejo y detección. 4 GBq de Ir<sup>192</sup> fueron inyectados en el

pozo Az-43 el día 14 de Marzo de 1984, utilizando para ello el agua separada proveniente del pozo Az-13. Se registró continuamente durante tres meses en los pozos circunvecinos Az-5, Az-13, Az-19 y Az-32, así como los manantiales de Laguna Verde y Maritimo.

La tercera prueba con trazadores es efectuada en la Zona Sur-Oriente del campo, en donde 7.4 GBq de  $^{132}\text{I}$  son inyectados en el pozo Az-26 con agua separada del pozo Az-18. Esta inyección sucedió el 31 de Agosto de 1984, y se analizaron muestras de agua separada de los pozos Az-18, Az-31 y el manantial de Los Azufres. El período registrado fué de cuatro meses.

En el mismo año de 1984, es realizado un estudio mas en la Zona Sur-Poniente del campo. El pozo seleccionado fué el Az-7, en donde fueron inyectados 14.8 GBq de Iridio, teniendo como pozos de observación los pozos Az-2, Az-16 y Az-16D. La fecha de inyección fué el 20 de Septiembre de ese año, y de igual manera, se registró la actividad presente en el agua separada de los pozos arriba mencionados, por un período de cuatro meses aproximadamente.

Posteriormente, en el siguiente año de 1985, se insiste nuevamente en realizar otra prueba con trazadores, ahora en la parte central de la Zona Sur, mejor conocida como Tejamaniles, en donde se seleccionó al pozo Az-33 para inyectarsele 14.8 GBq de  $^{192}\text{Ir}$ , cosa que acontece el día 28 de Marzo de ese año. Los pozos de registro son: Az-6, Az-17, Az-24, Az-36, Az-38 y Az-46. Es importante mencionar que con excepción del pozo Az-46, el resto de los pozos involucrados en este estudio, son productores de vapor seco. El lapso de registro en esta prueba fué de 7 meses a partir de la inyección del trazador.

Finalmente, la sexta y última prueba fué efectuada nuevamente en la Zona Sur-Oriente del campo de Los Azufres. En este caso fueron inyectados 12 GBq de Ir en el pozo Az-31, el día 30 de julio de 1987, utilizando agua separada del pozo Az-18, Az-26 y La Laguna de Los Azufres. Esta última prueba tuvo una duración de cuatro meses.

#### 4. Comentarios a las Pruebas efectuadas

Como puede apreciarse, el estudio del movimiento de fluidos en el subsuelo, mediante el uso de sustancias trazadoras ha sido bastante intensivo, especialmente en la Zona Sur del campo. A pesar de ello, persiste aún la incertidumbre sobre el comportamiento y estabilidad química de los trazadores utilizados en estos estudios, cuando son sometidos a presión y temperatura del yacimiento. Tampoco se comprende cabalmente el efecto de la interacción trazador-roca, en donde el fenómeno de adsorción juega un papel preponderante en el movimiento de éste a través del medio.

No obstante lo anterior, es posible señalar algunos errores u omisiones en estas pruebas, de

De forma tal, que sirvan como antecedentes para la reformulación de este tipo de estudios. En particular, la primera prueba utilizando elementos químicos naturales presentes en los fluidos (tales como  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ ) junto con los trazadores radioactivos, (ver fig. 1).

En la segunda prueba, en la Zona Norte, el trazador radioactivo es desplazado dentro del pozo Az-43 inyectando 40 ton/hr de agua separada proveniente del pozo Az-13. Lo anterior fué realizado durante 11 días a gasto constante. Un detalle importante aquí, es de que una vez concluida la prueba, el pozo Az-43 permaneció cerrado durante dos meses y posteriormente se abrió para su desarrollo. Se analizó el agua separada producida por éste, sin poderse encontrar indicios del trazador previamente introducido, por lo que se considera que este pudo ser de alguna manera, retenido por la formación o bien, pudo emigrar a suficiente distancia dentro del yacimiento, impidiéndole con ello su rápido retorno.

Las tres siguientes pruebas efectuadas en la Zona Sur del campo, muestran un comportamiento muy similar entre ellas, ya que en estas tres pruebas, se estuvo registrando la actividad de fondo presente en esta zona del campo, observándose un comportamiento similar al que acusa el registrado en el agua separada de los pozos observadores. En las figuras 2 y 3 se presentan los comportamientos generales, de las mediciones efectuadas en las pruebas de 1984, mientras que la fig. 4 muestra la actividad de fondo presente durante el mismo período.

La última de las pruebas efectuadas en Los Azufres, en donde se utilizó al pozo Az-31 como pozo reinjector, se considera en términos generales, como la menos confiable de todas las pruebas efectuadas hasta ahora. Debido principalmente, a que no existió un adecuado control de las muestras ni de las mediciones efectuadas sobre ellas. También, existieron en donde no se registraron mediciones, debido a problemas con los detectores utilizados. En fin, la información existente al respecto, hace prácticamente imposible cualquier interpretación.

Basados en la síntesis del trabajo hecho en materia de trazadores, en Los Azufres, existen cuatro puntos principales a señalar:

- (a) Se considera imprescindible, el realizar un estudio de laboratorio para estudiar el efecto de adsorción de la roca con los trazadores empleados. De otra forma, se continuará trabajando con la incertidumbre que este fenómeno provoca.
- (b) Se requiere plantear un modelo de dispersión del trazador en el medio, para poder definir de antemano, la frecuencia de muestreo adecuada en cada caso. Por ejemplo, en la primera prueba, se consideró la frecuencia de muestreo a ser inversamente proporcional al tiempo transcurrido desde el momento de la inyección.

- (c) Es necesario llegar a conocer el efecto que el cambio de fase del fluido, tiene sobre el trazador, pues en casos como Los Azufres, en donde los pozos de la Zona Sur producen predominantemente vapor, el conteo de la actividad presente, se efectúa en el condensado del mismo, debido a la ausencia de agua producida.
- (d) Se requiere revisar la metodología para la detección de la actividad presente en los fluidos producidos por los pozos. La importancia de esto se aprecia en la figura 5, en donde se muestra la actividad de una cápsula de cesio 137, colocada en el exterior del depósito utilizado para los conteos de agua separada. Inicialmente se colocaba la sonda detectora dentro del depósito sin mayor atención a su posición. Posteriormente, se adecuó una guía que permite a la sonda permanecer en el centro del recipiente. Se observó una atenuación en la dispersión de los valores registrados antes y después de la colocación de la guía.

## 5. Interpretación

Algunas de las pruebas efectuadas son de particular importancia, principalmente aquellas efectuadas en los pozos Az-7, Az-8 y Az-31. Estos pozos serán usados para la reinyección durante la operación de la planta, por consiguiente, es importante conocer hacia donde migra el agua inyectada. Como fué discutido anteriormente, fueron encontrados algunos problemas en la prueba realizada en el pozo Az-31, y el pozo de observación Az-22, no pudo ser abierto (debido a problemas mecánicos) hasta un tiempo después de comenzada la inyección. Así, los resultados (nulos) obtenidos son inútiles. De otra forma, la inyección del trazador en los pozos Az-7 y Az-8 fué satisfactoriamente realizada, aún y cuando no fué detectado el regreso del trazador en los pozos de observación (Az-2 y Az-16). Podemos concluir que: (a) el trazador fué retenido por el yacimiento por algún mecanismo, o (b) el arribo ocurrió después de que el registro en los pozos observadores concluyó; o bien la concentración del trazador es tan baja, que se escapa a la detección.

Para examinar estas posibilidades se revisaron los cambios químicos habidos en el pozo Az-16. En virtud de que en el pozo Az-7 se ha venido inyectando por largo tiempo, es de esperarse que la concentración de Cloruros en el yacimiento haya aumentado (ya que el Cloro se concentra en la salmuera debido a la separación del vapor). De hecho, fue observado un incremento en la concentración de Cloro en el pozo Az-16. Otra probable explicación para este incremento, sería que el pozo estuviera drenando fluido con alto contenido de Cloro, de mayor profundidad. De otra manera, una evidencia de mayor relieve fue descubierta al analizar el contenido de Nitrógeno producido por el pozo Az-16. Esta concentración de Nitrógeno en el pozo Az-16, es mayor que la solubilidad del Nitrógeno en el fluido geotérmico,

indicando que el Nitrógeno (el cual es inyectado al yacimiento a través de la válvula superior abierta en el pozo Az-7) se está moviendo a través del yacimiento, tanto disuelto en la fase líquida, como en forma gaseosa. El pozo Az-6, también muestra un incremento en la concentración de Nitrógeno.

Existe una evidente fuente para este atípico alto contenido de Nitrógeno, ya que se puede apreciar que el pozo Az-7 succiona grandes cantidades de aire a través de la válvula superior que opera normalmente abierta a la atmósfera. La cantidad de aire que entra al pozo es aún no conocida, sin embargo, la succión es lo suficientemente vigorosa que puede ser notada por personal trabajando en las vecindades del pozo. Se considera de cualquier forma, razonable suponer que la entrada de aire al pozo es considerable. Mas aún, se sabe que la entrada de aire es periódica (con un lapso de minutos) en todo momento, mientras ocurre la reinyección.

Así, parece evidente, a partir de este "trazador natural", que el agua reinyectada en el pozo Az-7 está regresando al pozo 16 y, quizá al pozo Az-6. Con objeto de estimar la razón de movimiento del agua reinyectada en el yacimiento, examinamos el historial químico de los pozos Az-16 y Az-6, en particular los datos de contenido de Cloro y Nitrógeno en la descarga. De esto se concluye que debería hacerse un esfuerzo por cuantificar el gasto de Nitrógeno entrando al pozo. Otra evidencia fué obtenida al graficar las razones de Argón y Argón/Nitrógeno de los pozos Az-16 y Az-6 (figuras 6 y 7) las que muestran que los gases son de origen atmosférico.

A partir de éstas gráficas, se hace evidente que el tiempo de tránsito entre el pozo Az-7 y los pozos Az-6 y Az-16 es del orden de meses, lo cual indica el porqué los trazadores radioactivos nunca fueron detectados. Esta es una conclusión alentadora, desde el punto de vista de la reinyección, ya que sugiere que la irrupción térmica del agua reinyectada será bastante lenta entre estos pozos en particular.