

GEOTERMIA

REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

ISSN 0186-5897

Volumen 21, No. 1

Enero-Junio de 2008

CONTENIDO

Editorial	1
Análisis geológico-productivo enfocado a la exploración de la parte oriental del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC Alvaro Aguilar Dumas	2
Estudio con trazadores de líquido y vapor en la zona Marítaro – La Cumbre del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Eduardo R. Iglesias, Magaly Flores Armenta, José Luis Quijano León, Marco A. Torres Rodríguez, Rodolfo J. Torres y Neftalí Reyes Picasso	12
Estudio sísmológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sísmicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos Javier Lermo, Yanet Antayhua, Luis Quintanar y Cecilia Lorenzo	25
Reducción del ruido en puntos de desfogue en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC Carlos A. Miranda Herrera	42
Modelo de costeo de pozos geotérmicos aplicado para el caso del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC Jaime M.E. Vaca Serrano	51
Investigación sobre bombas de calor en México operando con energía geotérmica y calor de desecho A. García-Gutiérrez, R. Barragán-Reyes y V. Arellano-Gómez	58
Foro	70
Una Tierra sin gente Bob Holmes (Traducción de Luis C.A. Gutiérrez-Negrín)	71
Asociación Geotérmica Mexicana: Congreso anual 2007 y XV Asamblea General Ordinaria	78
El Mundo de la Energía (Con información de Alfredo Mañón Mercado)	81

La revista **GEOTERMIA** es un órgano virtual de información técnica publicado por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de edición semestral. Su Certificado de Licitud de Título es el número 2784 del 2 de octubre de 1985, y su Licitud de Contenido es el número 2514 del 1 de diciembre de 1986, ambos expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. **GEOTERMIA – REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA** es nombre registrado en la Dirección General de Derechos de Autor de la Secretaría de Educación Pública, con la Reserva 01.86. Reservados todos los derechos de reproducción del material publicado. Registro ISSN 0186-5897.

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos no asume ninguna responsabilidad con relación a la veracidad o exactitud de los datos o conclusiones presentados en los artículos. Tampoco avala ni sugiere el uso de productos comerciales, los cuales son eventualmente citados sólo con fines descriptivos.

La autorización para citar fuentes ajenas a la Comisión Federal de Electricidad corre a cargo de los autores. Las opiniones vertidas son responsabilidad exclusiva de ellos y no reflejan necesariamente las opiniones, políticas o programas oficiales de la Comisión Federal de Electricidad.

EDITORES

Director: José Luis Quijano León
Editor: Luis C.A. Gutiérrez Negrín

Consejo Editorial:

Alejandro Becerril Zavala
Jesús de León Vivar
Magaly Flores Armenta
Raúl Sánchez Velasco
Jaime Vaca Serrano

Editores asociados:

Víctor Arellano Gómez (IIE)
Víctor Hugo Garduño Monroy (UMSNH)
Susan F. Hodgson (Historiadora de temas geotérmicos y petroleros)
Alfredo Mañón Mercado (Consultor)
José Manuel Romo Jones (CICESE)
César Suárez Arriaga (UMSNH)

Secretaria:

Enedelia Calderón Ochoa

Responsable de sitio en página de la UMSNH:

Ubaldo Ruiz López

Oficinas:

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas
Morelia, Mich., 58290
Tel. (443) 322-7072

Correos: luis.gutierrez03@cfе.gob.mx, luis.gutierrez@geotermia.org.mx, l.g.negrin@gmail.com,
luis.quijano@geotermia.org.mx

Editorial

En este número se publican cinco trabajos sobre los campos geotérmicos mexicanos de Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros, y uno más sobre investigación y desarrollo de las bombas de calor en México.

Tres de esos trabajos fueron presentados en la II Reunión Interna de Mejora Continua (II RIMC) que llevó a cabo la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE en febrero de 2007, evento mencionado ya en el número inmediato anterior de esta revista. Son los artículos de Álvaro Aguilar sobre la exploración en la porción oriental del campo de Cerro Prieto, de Carlos Miranda sobre las características de un silenciador para puntos de desfogue en este mismo campo (que podría ser aplicado también en otros campos), y el de Jaime Vaca que presenta un modelo de costeo para pozos geotérmicos y lo aplica para el caso de Cerro Prieto. Sobre este último trabajo, cabe advertir que se presentan costos actualizados de pozos, efectivamente erogados en el año 2006, pero que el contrato de perforación de esos pozos se firmó en 2004 y corresponde a una licitación pública internacional realizada ese mismo año, cuando las condiciones del mercado de perforación eran distintas a las actuales. Esto quiere decir que si se planeara perforar un pozo en estos momentos, podrían obtenerse costos más elevados, lo que desde luego no invalida los méritos del modelo de costeo.

Los otros tres trabajos fueron preparados para el congreso anual 2007 de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), celebrado en el campo geotérmico de Los Humeros bajo las características que se reseñan en una nota de la sección **Foro** de este mismo número. Uno de esos trabajos es el de Eduardo Iglesias y colaboradores, que reporta los resultados actualizados de una prueba con trazadores químicos de líquido y de vapor en el campo de Los Azufres. Otro, es el de Alfonso García, Rosa María Barragán y Víctor Arellano, que hace una apretada pero completa reseña sobre las diversas pruebas y proyectos sobre bombas de calor geotérmico en México, aplicación directa de la geotermia que ha tenido un fuerte y sostenido desarrollo en los últimos años en Europa y Estados Unidos (como se indica en una de las notas de *El Mundo de la Energía* de este mismo número). Debido a complicaciones de última hora, estos dos trabajos no fueron presentados oralmente en el congreso, pero quedaron incluidos en las memorias del mismo. Otro trabajo, este sí presentado oralmente, es el de Javier Lermo y asociados, que reporta la primera parte de un amplio estudio sísmológico realizado justamente en el campo de Los Humeros. Con estas colaboraciones empezamos la publicación de los trabajos del congreso de la AGM, la cual continuaremos en números ulteriores.

En la sección **Foro** incluimos la columna fija de *El Mundo de la Energía*, así como la traducción al español de un interesante artículo publicado por el semanario inglés de divulgación científica *New Scientist*, que aunque apareció hace más de un año, ofrece una novedosa perspectiva para evaluar el grado e intensidad en que nuestra sociedad industrial ha modificado el ecosistema global, partiendo de la premisa de lo que probablemente ocurriría si desapareciéramos súbitamente de la faz de la Tierra.

Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

Análisis geológico-productivo enfocado a la exploración de la parte oriental del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Álvaro Aguilar Dumas

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto. Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26.5, Mexicali, B.C. México. Correo: alvaro.aguilar@cfe.gob.mx

Resumen

La parte oriental del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), conocida como Polígono Nuevo León, representa una área potencial con recursos geotérmicos comprobados, lo que demuestran siete pozos direccionales que se han perforado hacia el este, así como el pozo vertical M-200, localizado dentro del polígono. El pozo M-200 se perforó en 1984 y ha producido a la fecha alrededor de 4 millones de toneladas de vapor, estando integrado al sector CP-2 una producción de 68 t/h de vapor. Actualmente la parte oriental del CGCP, que representa el 25% del área total del campo, produce más de la mitad del total de vapor del campo. El suministro de vapor en los últimos años se ha logrado cubrir aumentando el número de pozos en operación localizados en la zona oriente del CGCP (Rodríguez, 2006), ya que es aquí donde hay condiciones de presión, entalpía y temperatura del yacimiento que son mejores que en otras áreas del campo. Sin embargo, en el mediano plazo se aprecia la necesidad de incorporar al Polígono Nuevo León al área de producción, y extender así la vida productiva del CGCP. Se realiza un análisis geológico y se presentan configuraciones de producción de vapor, temperatura y entalpía desde el CGCP hacia dicha área potencial.

Palabras Clave: Cerro Prieto, exploración, sector oriental, Polígono Nuevo León, producción de pozos.

Geological and production analyses focused on exploration of the eastern part of the Cerro Prieto geothermal field, BC

Abstract

The eastern part of the Cerro Prieto geothermal field (CGCP), known as Polígono Nuevo León, is an area with proven geothermal resources, as confirmed by seven directional wells located toward the east and by vertical well M-200 located inside the polygon. Well M-200 was drilled in 1984 and has produced about 4 million tons of steam to date. It is integrated into the CP-2 sector, producing 68 t/h of steam. Presently the eastern part of CGCP, representing 25% of the total field area, is producing over half of the steam for the entire field. In the last few years, the steam has come only after increasing the number of production wells located in the eastern zone of CGCP (Rodríguez, 2006), where pressure, enthalpy and temperature conditions are better than in other parts of the field. However in the long term it will be necessary to incorporate Polígono Nuevo León into the productive area to expand the productive life of CGCP. This paper includes a geological analysis, plus models for steam production, temperature and enthalpy for Polígono Nuevo León.

Keywords: Cerro Prieto, exploration, eastern sector, Polígono Nuevo León, well production.

1. Introducción

El Campo Geotérmico Cerro Prieto (CGCP), se compone de un yacimiento geotérmico de líquido dominante, alojado en un ambiente sedimentario. Está ubicado en una cuenca de tipo *pull-apart*, formada por los sistemas de fallas de Cerro Prieto e Imperial que son parte del sistema de fallas de San Andrés.

El CGCP empezó a explotarse comercialmente en 1973. A partir de esa fecha se ha extraído vapor geotérmico que se distribuye a las diferentes centrales generadoras. Actualmente se tiene una capacidad instalada de 720 MW y se extraen aproximadamente 5800 t/h de vapor para cumplir la demanda de las centrales. Hay un total de 353 pozos perforados, de los cuales alrededor de 170 se encuentran integrados al proceso productivo. El presente estudio se refiere específicamente a la parte este del campo, y tiene como objetivo evaluar las características geológicas y geotérmicas de la misma para tratar de incluirla al área de producción, extendiendo de esta manera la vida productiva del campo. Para ello, se realiza un análisis geológico y se presentan configuraciones de producción de vapor, temperatura y entalpía desde el CGCP hacia el área oriental, conocida como Polígono Nuevo León.

El CGCP se encuentra en el estado de Baja California, 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, entre los meridianos 115° 12' y 115° 18' longitud oeste y los paralelos 32° 22' y 32° 26' de latitud norte.

2. Geología

La zona geotérmica del Valle de Mexicali, se localiza dentro de la cuenca de Salton, que abarca desde el Salton Sea en la porción sur del estado de California, Estados Unidos, hasta el Golfo de California y forma parte del sistema tectónico de San Andrés, formado por fallas transcurrentes con desplazamientos normales, de dirección general NO-SE (Fig. 1).

Las fallas más importantes reconocidas en la zona del CGCP son la Cucapá, Cerro Prieto, Michoacán e Imperial (Aguilar, 2006).

2.1. Geología Regional

El CGCP está localizado en la planicie deltaica del Río Colorado, la cual forma parte de la depresión estructural conocida como depresión de Salton. A nivel regional el área corresponde a una gran cuenca de origen tectónico rellena de sedimentos continentales y marinos Terciarios-Cuaternarios, que sobreyacen a un basamento constituido por rocas graníticas. El límite occidental de la cuenca lo forma la Sierra Cucapá, que está compuesta por rocas ígneas intrusivas.

La estructura volcánica de Cerro Prieto consta de dos centros eruptivos superpuestos y es el origen de los afloramientos de rocas volcánicas andesíticas y riodacíticas (Vázquez, 1998).

La distribución de los sedimentos en el Valle de Mexicali y Valle Imperial se ha visto afectada por el movimiento hacia el NO de la Península de Baja California a lo largo del sistema de Fallas San Andrés, desde hace aproximadamente cuatro millones de años. Se ha estimado una velocidad de desplazamiento de 36 mm al año a lo largo de la Falla San Andrés, que junto con el desplazamiento hacia el norte de la península de las fallas Imperial, Elsinore, Laguna Salada, Cerro Prieto, etc., sugiere un desplazamiento de rumbo N-NO del orden de 300 km de la península con respecto al continente. El efecto de este movimiento en la desembocadura del Río Colorado durante el Plio-Cuaternario es el alargamiento de las cuencas de Salton y de Cerro Prieto hasta convertirlas en cuencas tipo *pull apart*, elongadas en dirección NO, y la actividad magmática reciente que constituye la fuente de calor para el yacimiento geotérmicos (Lira, 2005).

2.2. Geología Local

Las unidades litológicas de la más antigua a la más joven son las siguientes:

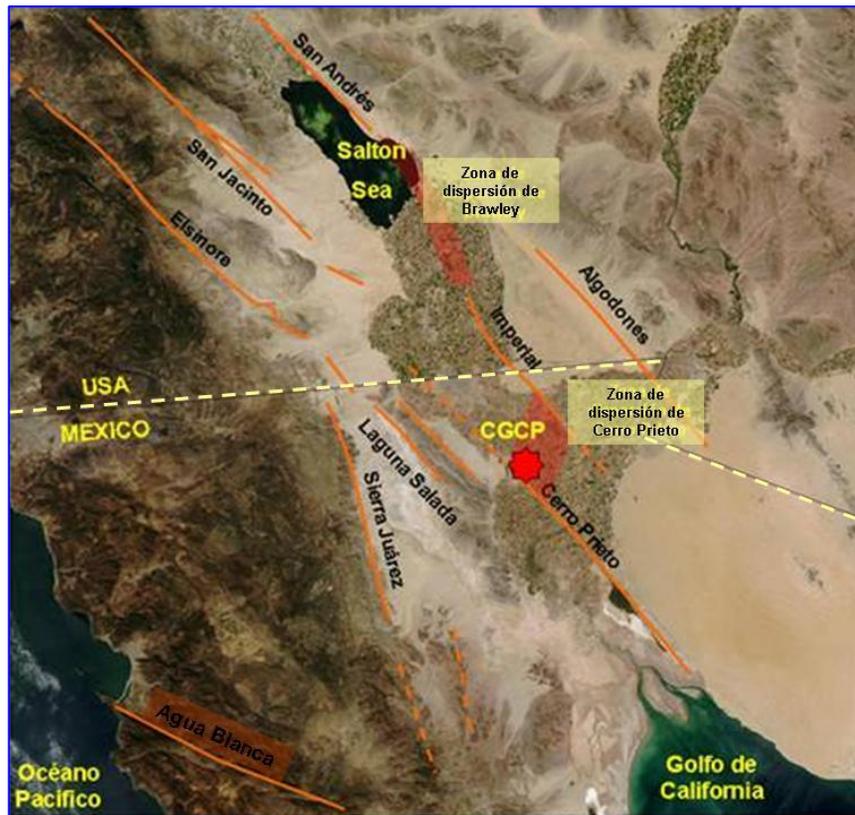


Fig. 1. Rasgos estructurales regionales relacionados con el CGCP

Rocas Batolíticas del Cretácico (*Edad aproximada de 120 Ma*): Los principales ejemplos de este tipo de rocas cercanas al CGCP, forman gran parte de la Sierra Cucupa y de la Sierra El Mayor, y son de composición granítica a tonalítica.

Rocas Sedimentarias del Terciario (*Edad de 13.5 a 1.8 Ma*): Compuestas por una secuencia de lutita gris a negro intercalada con areniscas de cuarzo de grano fino a medio. Los fluidos geotérmicos se alojan en las areniscas. La cima de esta unidad está constituida por lutitas de color café y lodolitas, y en el área del Polígono Nuevo León se estima encontrarla entre los 1800 y 2400 m de profundidad.

Depósitos Aluviales del Pleistoceno y Reciente (*Edad de 1.8 millones a 100 mil años*): En el CGCP se les conoce como Sedimentos Clásticos No Consolidados (SCNC) y están conformados por secuencias de arenas,

gravas y arcilla plástica color café. Su espesor varía entre 500 a 2300 metros, estando su base a mayor profundidad en el sector oriental del CGCP.

Rocas Extrusivas del Cuaternario: Están presentes en el volcán Cerro Prieto y son de composición andesítica a riocácica.

2.3. Geología Estructural

Localmente se observan tres importantes fallas en la zona (Figura 2), que son las de Cerro Prieto, Michoacán y el llamado sistema de Fallas H.

Dentro del CGCP la falla Cerro Prieto (FCP) es de rumbo NE-SO, con echado al SO de 75°-80°. Pertenece al sistema de fallas Cerro Prieto, el cual es un sistema del tipo dextral que se extiende desde el centro de dispersión de Cerro Prieto hasta la Cuenca de Wagner. El trazo de la falla es visible únicamente en su sector sur; la parte norte ha sido determinada por mecanismos focales y métodos geofísicos. Con base en la localización de hipocentros de movimientos sísmicos, se ha calculado que la FCP se extiende 34 km adicionales al noroeste de su último afloramiento reconocido, aproximadamente a 32° 42' de latitud N (Magistrale, 2002). Es la estructura que marca la frontera entre las Placas de Norteamérica y Pacífico, en la región del Valle de Mexicali; su desplazamiento promedio es mayor a 50 mm al año (Cruz-Castillo, 2002).

La falla Michoacán pertenece al mismo sistema de fallas Cerro Prieto, de rumbo NO-SE y echado variable al SE. Esta estructura y la falla Cerro Prieto forman un *horst* o bloque levantado que se acuña al sur. En este bloque se aloja el sector del CGCP conocido como Cerro Prieto I (CP-1) (Fig. 2).

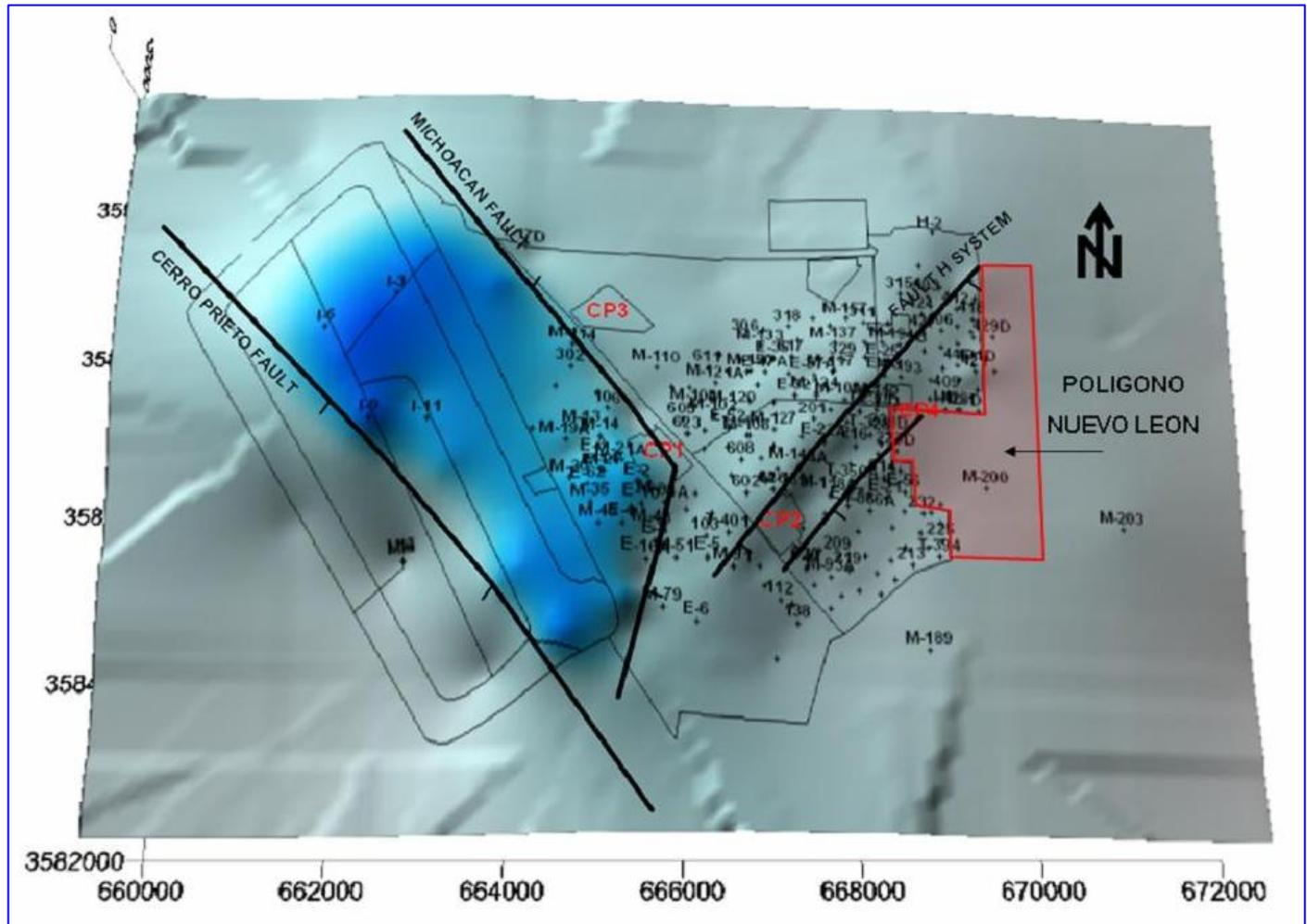


Fig. 2. Rasgos estructurales en el CGCP, representados en la cima de la Lutita gris.

El sistema de fallas H, de rumbo NE-SO y echado al SE de 45° a 65° , es producto de los esfuerzos de tipo dextral entre la Falla Imperial y el sistema de Fallas Cerro Prieto.

La cuenca tectónica en donde se encuentra el yacimiento está limitada al este por la Falla Imperial y al oeste por la Falla Michoacán.

Esto define cuatro bloques estructurales claramente definidos, en donde: CP-1 se encuentra en el bloque alto central (AC) y la cima de la Lutita Gris se halla entre 400 y 700 metros bajo el nivel del terreno (mbnt); CP-2 y CP-3 están en el bloque bajo central (BC), con la cima de la Lutita Gris entre 1000 y 1500 mbnt; CP-4 en el bloque bajo este (BE), con la cima de la Lutita Gris entre 1800 y 2400 mbnt; y el bloque caído al oeste (BO), donde la cima de la Lutita Gris se conoce a más de 2000 m de profundidad (pozo I-15). El Polígono Nuevo León, se encuentra también en el bloque bajo este (BE).

3. El Polígono Nuevo León

El CGCP se encuentra dividido en cuatro sectores conocidos como CP-1, CP-2, CP-3 y CP-4. Para efectos de este trabajo el campo se dividió en tres áreas, denominadas como área occidental, área central y área oriental. El área oriental comprende CP-4, parte de CP-2 y el Polígono Nuevo León (PNL), el cual representa un área potencial con recursos geotérmicos comprobados ya que hay siete pozos direccionales (429D, 431D, 428D, 230D, 231D, 223D y 228D) que se han perforado en las partes orientales de CP4 y CP2, así como el pozo vertical M-200, perforado directamente en el PNL (Fig. 3).

El PNL se localiza en terrenos ejidales pertenecientes al Ejido Nuevo León del Municipio de Mexicali, BC, y está formado por tierras de uso agropecuario con una superficie de 312 hectáreas.

Actualmente las zonas con mejores producciones de vapor, mayor temperatura y mejor entalpía del CGCP se localizan en la parte oriental del campo. Por ello, es necesario extender el área de explotación del campo hacia el PNL, a fin de garantizar el suministro de vapor con la cantidad y oportunidad necesaria.

Desde el punto de vista geológico, el PNL se encuentra en una cuenca tipo *pull apart*, formada entre la Falla Michoacán al oeste y la Falla Imperial al este.

En el PNL el inicio de la Zona de Sílice y Epidota (ZSE), que es indicativa de la zona productora, se localiza a partir de los 2300 m de profundidad en su porción noroeste, pero se profundiza hacia el sureste por lo menos hasta los 3000 m. Por lo tanto, la profundidad propuesta para futuro pozos a ubicar en el PNL está entre 2750 y 3450 m, con intervalos de producción de 2350 a 3450 m (Lira, 2000).

Se configuraron en planta los datos de las mediciones que se reportan por parte de la Residencia de Suministro de Vapor, entre ellas: producción de vapor en t/h (Fig. 4), entalpía en kJ/kg (Fig. 5) y temperatura en grados Celsius (Fig. 6). Estas configuraciones resaltan las áreas de mejor producción y mayores temperaturas y entalpías, que se ubican justamente hacia la porción oriental del campo, lo que ratifica la necesidad de ampliar el área de producción hacia el PNL, para extender así la vida productiva del CGCP.

Así, en la Figura 4 se puede apreciar que los pozos que se perforen en el PNL tendrán probablemente producciones superiores a las 50 t/h, pudiendo llegar hasta las 80 t/h en su parte media. En la Figura 5 se observa que en ese mismo polígono los fluidos de los pozos podrían presentar entalpías superiores a los 2000 kJ/kg, con máximos probables de hasta 2600 kJ/kg en su porción noreste. En la Figura 6, finalmente, la configuración permite pronosticar temperaturas hasta de 370° C para esos mismos pozos.

Por su parte, los pozos direccionales 429D, 431D, 230D, 231D, 223D, 228D se localizan prácticamente en la periferia del PNL, mientras que el pozo vertical M-200 se encuentra dentro de él, en su porción centro-sur, como se observa en las figuras 4, 5 y 6. Este pozo vertical se ubica a 875 m al oriente del pozo E-56, que pertenece al sector CP-2, y a 843 m al sur del pozo 423, que está localizado sector CP-4. Por lo tanto, se halla en pleno PNL. La producción conjunta de esos pozos direccionales más la del pozo vertical es de 428 t/h de vapor, lo que arroja un promedio de 61 t/h por pozo, con una entalpía media de 1984 kJ/kg. En particular, el

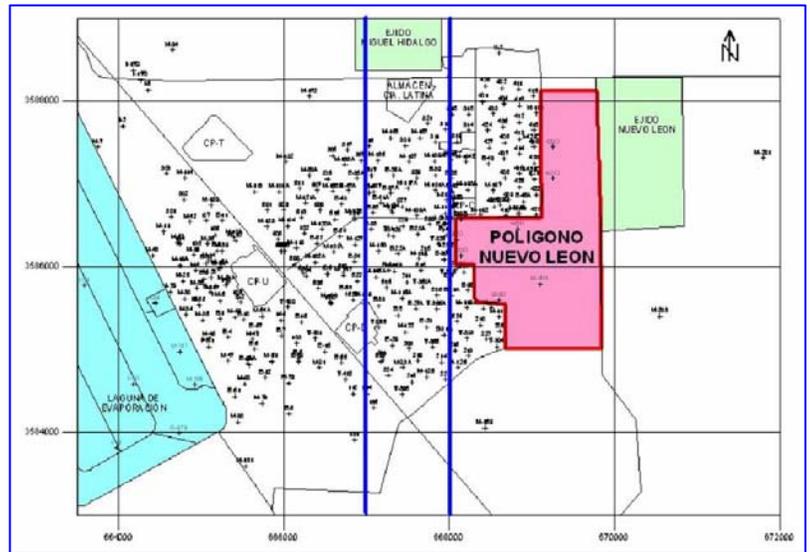


Fig. 3. Ubicación del Polígono Nuevo León en el CGCP.

pozo M-200 se perforó en 1984 y ha producido a la fecha alrededor de 4 millones de toneladas de vapor. Actualmente se encuentra integrado al sector CP-2 con 68 t/h de vapor, 39 t/h de agua y una entalpía de 2,088 kJ/kg.

Cabe recordar además que la porción oriental del campo representa una cuarta parte de la extensión

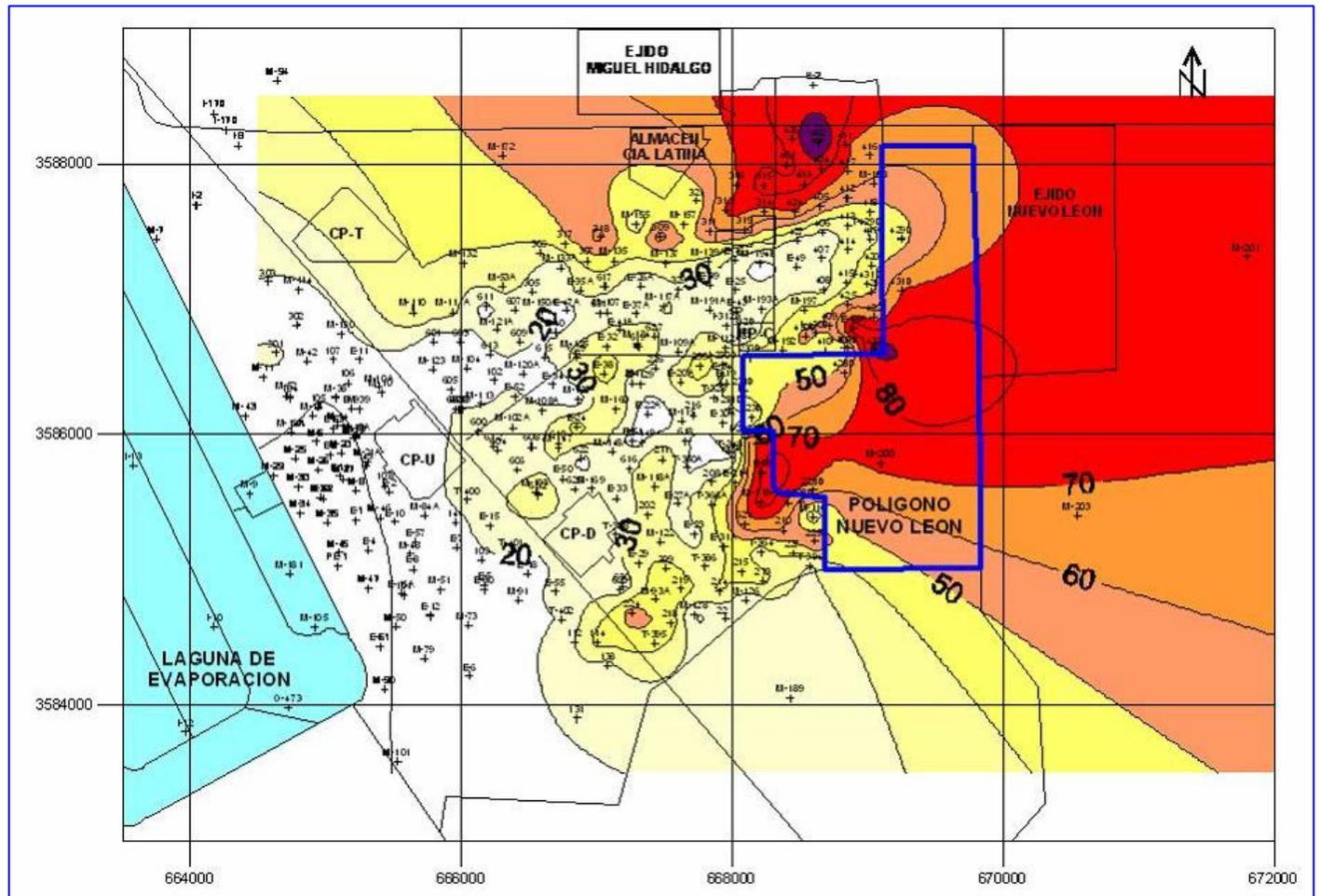


Fig. 4. Curvas de igual producción de vapor en t/h en el CGCP y el PNL.

superficial del CGCP. Sin embargo, en ella están localizados pozos que producen actualmente alrededor de 3 mil t/h de vapor, que es más del 50% de la producción total de vapor del campo (Rodríguez, 2006).

Lo anterior hace evidente la necesidad de integrar el área del PNL al área productiva del CGCP. Con ello, los futuros nuevos pozos que se perforaran ahí tendrían altas probabilidades de resultar buenos productores y contribuirían a satisfacer las necesidades de vapor en el mediano y largo plazo.

4. Condiciones probables del yacimiento en el PNL

Es probable que algunas condiciones anómalas que se presentan en el sector CP-4 ocurran también en el subsuelo del PNL. Entre ellas cabe destacar:

- La zona se encuentra afectada por la influencia del sistema de Fallas H (Fig. 2).
- Los estudios de isotopía indican la presencia de fluidos más someros que pueden estar infiltrándose al yacimiento a través de dicho sistema (Fig. 7).

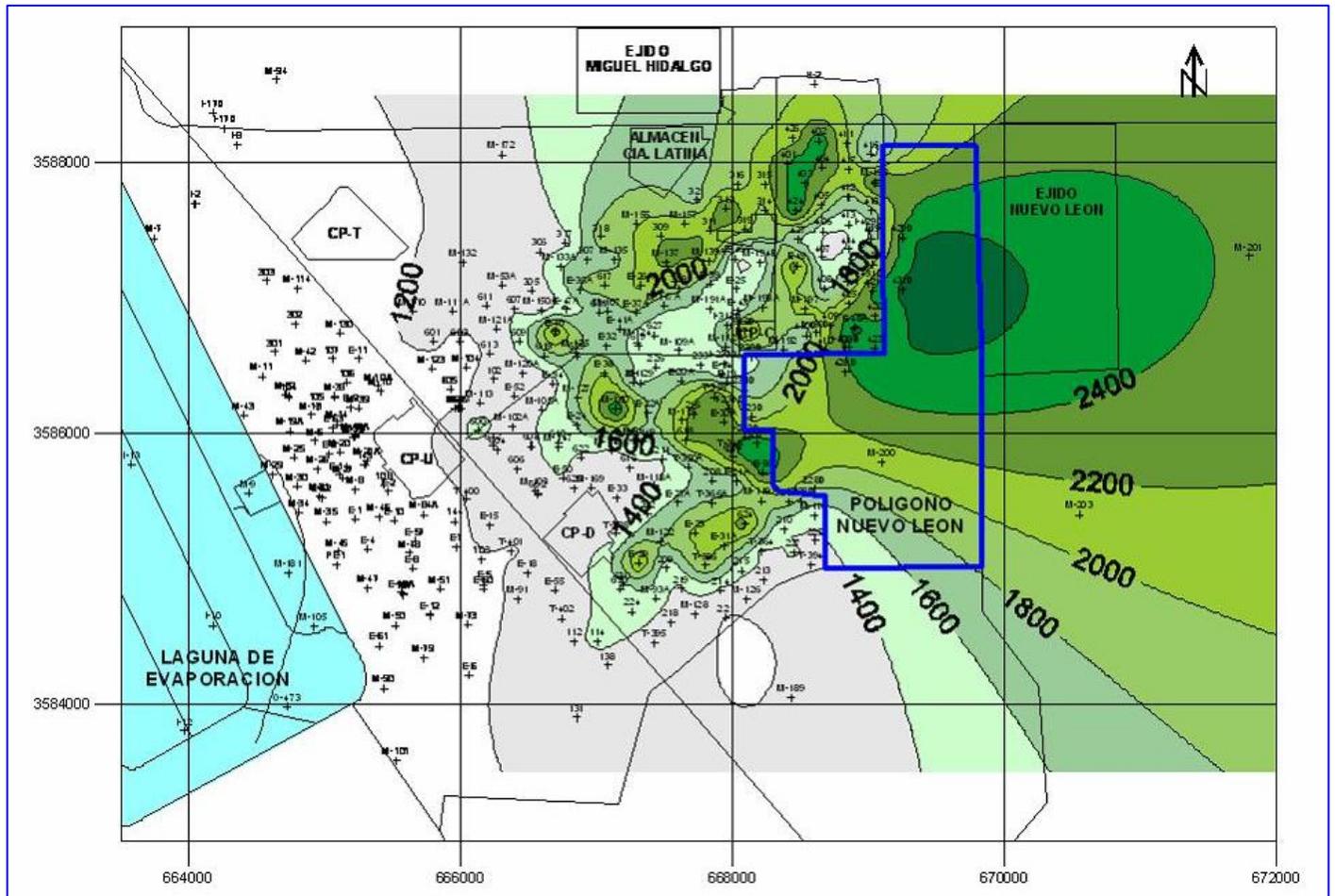


Fig. 5. Curvas isoentálpicas en el CGCP y en el PNL.

- La zona productora probablemente estará a mayor profundidad que el inicio de la cima de la ZMSE. En particular, es probable que no se presente la zona conocida como el “domo”, que es un “levantamiento” importante de la cima de la ZMSE (Fig. 7).
- En los últimos años se han detectado condiciones corrosivas en tuberías de pozos ubicados en el sector CP-4, tales como los pozos 409, 410, 430D, NL-1, M-192, 428D, 423, 424, 425, 429D, 431D y M-198, algunos de los cuales han arrojado fragmentos de sus tuberías de revestimiento. Estos pozos presentan entalpías altas, un proceso de ebullición importante y de condensación de vapor, debido a la escasa recarga del yacimiento en esta área. Sin embargo, parece descartada la existencia de un yacimiento hidrotermal ácido (IIE, 2006).

Es importante comentar también que hacia el PNL se ubica la denominada anomalía magnética Nuevo León, que es uno de los principales resultados de los estudios magnetométricos realizados desde 1977 en el CGCP, y que en su momento se asoció a la probable ubicación de la fuente de calor en el subsuelo del polígono.

En efecto, las altas temperaturas a profundidades relativamente escasas, sugieren que en el subsuelo del PNL se encuentre la fuente de calor del sistema, que ha sido modelada como una intrusión ígnea joven, de entre 30 mil y 50 mil años de antigüedad, posiblemente de composición gabroica y que podría ubicarse a unos 5 kilómetros de profundidad (Elders *et al.*, 1982).

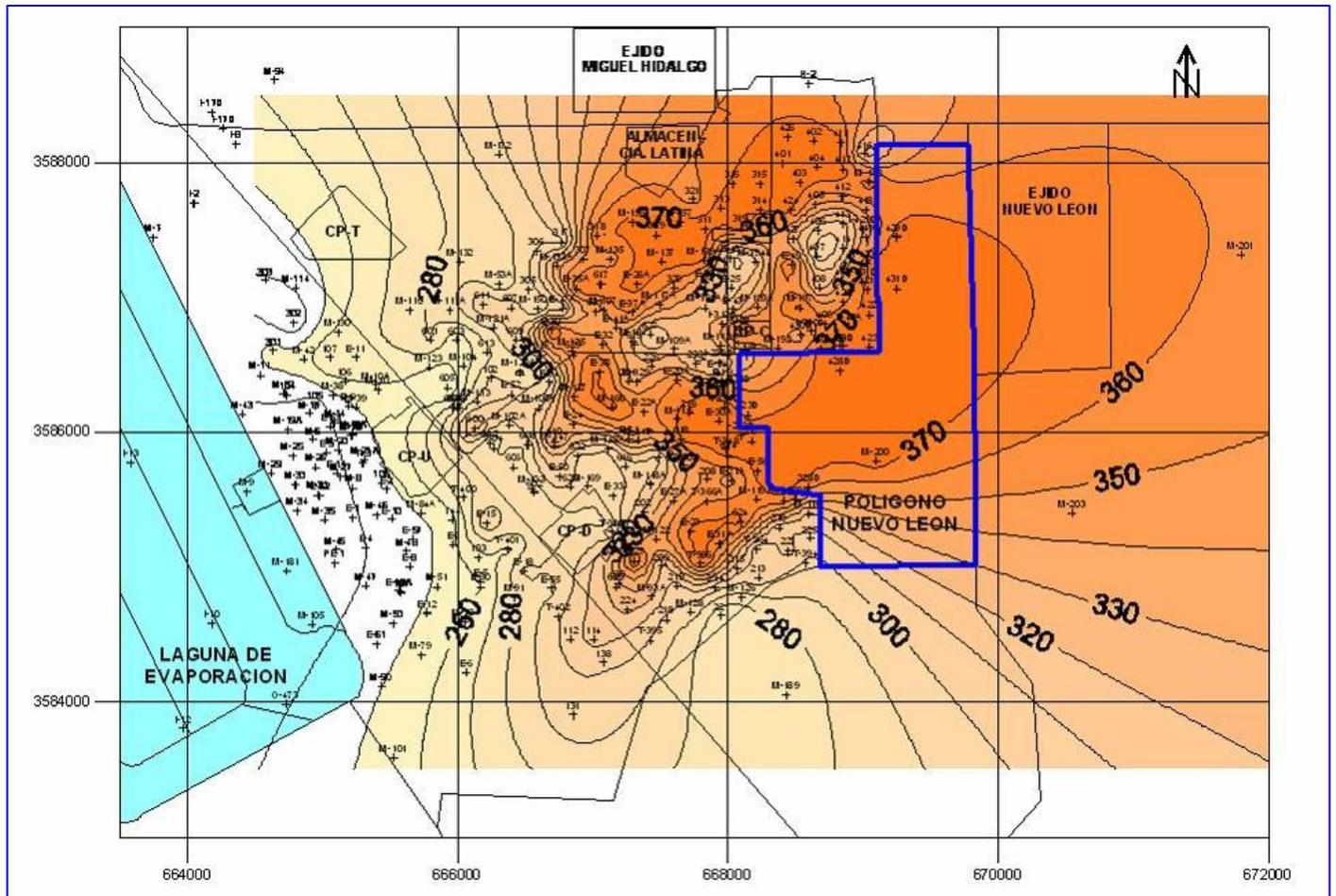


Fig. 6. Configuración de isotermas en el CGCP y el PNL.

La zona de debilidad cortical generada durante el Terciario sería la responsable del emplazamiento de dicho intrusivo básico en la cuenca de Cerro Prieto, el cual a su vez es el causante de la anomalía magnética Nuevo León. El intrusivo parece haber sido alimentado por nuevas intrusiones magmáticas debidas a la actual tectónica extensional del Golfo de California (Lira, 2000).

5. Conclusiones y recomendaciones

- El yacimiento geotérmico del CGCP es dinámico. Con el paso del tiempo y debido a los procesos de producción, las mejores condiciones se han ido desplazando y profundizando hacia su porción oriental. A la fecha es evidente que las zonas de mejor producción de vapor, entalpía y temperatura se encuentran en esa parte, es decir hacia el Polígono Nuevo León.
- La demanda de vapor en los últimos años se ha logrado cubrir porque se ha aumentado el número de pozos en operación ubicados en la zona oriental del CGCP (Rodríguez, 2006), ya que es aquí donde hay condiciones de presión, entalpía y temperatura del yacimiento mejores que en otras áreas del campo. A mediano plazo es necesario integrar al PNL al área de producción actual, y extender así la vida productiva del CGCP.

- Las condiciones geológicas de la parte norte del PNL se estiman similares a las que actualmente se conocen en el sector CP-4. Así, el PNL estará afectado por la influencia del sistema de fallas H, lo cual provoca infiltración de fluidos más someros al yacimiento, y probablemente presentará como zonas con fluidos corrosivos.

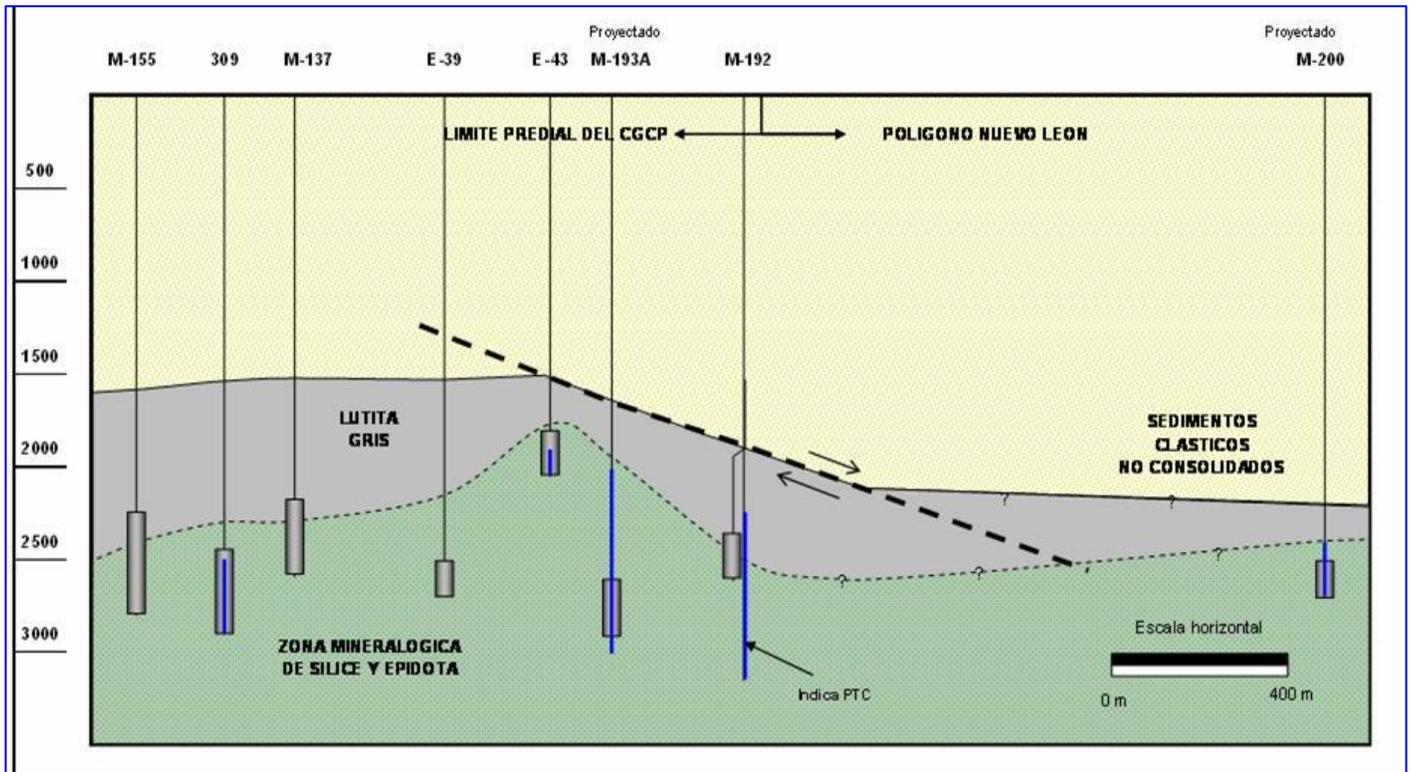


Fig. 7. Sección geológica NO-SE, viendo al NE.

- Dado que el PNL se ubica en la zona donde se ubicó la anomalía magnética Nuevo León, la perforación de pozos en esa área servirá también para definir y estudiar mejor esa anomalía y su relación con la fuente de calor del sistema geotérmico.

Referencias

- Aguilar, A., 2006. Update of the Cerro Prieto Geological Model. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 30, pp. 3-7.
- Cruz-Castillo, M., 2002. Catálogo de las Fallas Regionales Activas en el Norte de Baja California, México. Informe interno del Instituto Mexicano del Petróleo, Mexico. Inédito.
- Elders, W.A., D.K. Bird, A.E. Williams, P. Schiffman, y B. Cox, 1982. Modelo para una fuente de calor del sistema magmático hidrotermal de Cerro Prieto, Baja California, México. *Cuarto Simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto Baja California, México*, Vol. 2, pp. 661-681.
- IIE, 2006. Estudios Geocientíficos del Polígono Hidalgo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Reporte IIE/11/12875 01/F, Febrero 2006. Inédito.
- Lira H., H., 2000. Condiciones geológicas del Polígono Nuevo León. Informe Interno RE-021/2000, CFE, Residencia General Cerro Prieto. Inédito.

- Lira Herrera, H., 2005. Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-46.
- Magistrale, H., 2002. The relation of the southern San Jacinto fault zone to the Imperial and Cerro Prieto faults. In: Barth, A., ed., *Contributions to Crustal Evolution of the Southwestern United States*, Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 365, pp. 271-278.
- Rodríguez, M.H., 2006. Análisis de la producción de vapor del CGCP y su perspectiva. Informe interno, CFE, Residencia General Cerro Prieto. Inédito.
- Vázquez G., Rogelio, 1998. Estudio geohidrológico del campo geotérmico Cerro Prieto. Informe Técnico RE-05/98, CICESE. Inédito.

Estudio con trazadores de líquido y vapor en la zona Marítaro – La Cumbre del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Eduardo R. Iglesias⁽¹⁾, Magaly Flores Armenta⁽²⁾, José Luis Quijano León⁽²⁾, Marco A. Torres Rodríguez⁽²⁾, Rodolfo J. Torres⁽¹⁾ y Nefalí Reyes Picasso⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, 62490 Cuernavaca, Mor., México. ⁽²⁾Comisión Federal de Electricidad, Alejandro Volta 655, 58290 Morelia, Mich., México. Correo: iglesias@iie.org.mx

Resumen

Se efectuaron dos pruebas simultáneas en la zona Marítaro-La Cumbre del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., México. Los objetivos de estas pruebas fueron determinar si la salmuera de desecho inyectada en el pozo Az-15 recarga las zonas de alimentación de seis pozos productores designados por CFE, y estimar qué fracción de lo inyectado recarga dichos pozos productores. Debido a que sólo tres de los pozos productores producen agua y todos producen vapor, se utilizaron dos trazadores: hexafluoruro de azufre (SF₆) para la fase vapor y 1,3,6-trisulfonato de naftaleno (1,3,6-tsn) para la fase líquida. Todos los pozos de observación registraron el SF₆, y los tres pozos que producen agua registraron además el 1,3,6-tsn, probando que los fluidos inyectados en el pozo Az-15 recargan las zonas de alimentación de los pozos productores monitoreados. En los tres pozos en los que se detectó el trazador de fase líquida continuaban recuperándose cantidades significativas de 1,3,6-tsn al suspenderse el muestreo. Los totales de 1,3,6-tsn recuperados en los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28 hasta 279 días después de la inyección, fecha en que se suspendió el muestreo, fueron respectivamente 6.1%, 0.90% y 0.16%, para un total recuperado de 7.61%. Se concluye que estas cantidades representan cotas inferiores para las magnitudes de recuperación esperadas en cada uno de los pozos y para el total recuperado. Cuando se suspendió el muestreo, los pozos Az-65D, Az-66D y Az-30 continuaban produciendo SF₆ a bajas concentraciones, y el resto de los pozos no registraba producción del trazador de vapor. Los totales recuperados en los pozos Az-65D, Az-04, Az-41, Az-30, Az-28 y Az-66D fueron respectivamente 4.82 e-02%, 1.37 e-03%, 1.48 e-03%, 6.38 e-04%, 1.38 e-03% y 4.31 e-04%, para un total de 5.35 e-02%. La recarga por líquido resultó órdenes de magnitud mayor que la recarga por vapor.

Palabras clave: Trazadores geotérmicos, trazadores de líquido, trazadores de vapor, Los Azufres.

Study of liquid and steam tracers at the Maritaro – La Cumbre area of the Los Azufres geothermal field, Mich.

Abstract

We ran two simultaneous tracer tests in the Maritaro-La Cumbre area of the Los Azufres geothermal field in Mexico. We wished to determine whether or not fluids injected in well Az-15 recharged the productive areas of six production wells and to estimate the fractions of injected fluid recovered in them, if any. Because only three of the wells produce water and all of them produce steam, two tracers were used, sulfur hexafluoride (SF₆) for the gas phase and 1,3,6 naphthalene trisulfonate (1,3,6-nts) for the liquid phase. All of the observation wells recorded SF₆, and the three water-producing wells recorded 1,3,6-nts, proving that fluids injected in well Az-15 do recharge the area of interest. When sampling was suspended, the three water-producing wells were still producing 1,3,6-nts at significant rates. The total recovery of 1,3,6-nts at wells Az-

65D, Az-04 and Az-28, 279 days after injection when sampling was halted, were, respectively, 6.1%, 0.90% y 0.16%, for a total of 7.61%. We concluded that these quantities constitute the lower boundaries for the respective recovery factors. When sampling was halted, wells Az-65D, Az-66D and Az-30 were still producing some SF₆ at lower rates, and the rest of the wells were no longer recording the gas phase tracer. The total recovery of SF₆ at wells Az-65D, Az-04, Az-41, Az-30, Az-28 and Az-66D were, respectively, 4.82 e-02%, 1.37 e-03%, 1.48 e-03%, 6.38 e-04%, 1.38 e-03% y 4.31 e-04%, for a total of 5.35 e-02%. The liquid recharge occurred in orders of magnitude greater than the steam.

Keywords: Geothermal tracers, liquid tracers, steam tracers, Los Azufres.

1. Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) inyecta típicamente 120-250 toneladas por hora (t/h) de salmuera de desecho, producidas en diversas zonas del campo geotérmico de Los Azufres, en el pozo Az-15. Al inicio de este estudio el destino de las salmueras inyectadas no se conocía con certeza. Temprano en la vida del campo, la hidrología indicaba que los fluidos inyectados en el pozo Az-15 se desplazarían hacia el oeste del mismo (Fig. 1). Pero después de dos décadas de producción, se consideró posible que el gradiente de presión actual favorezca la recarga de la zona norte del campo.

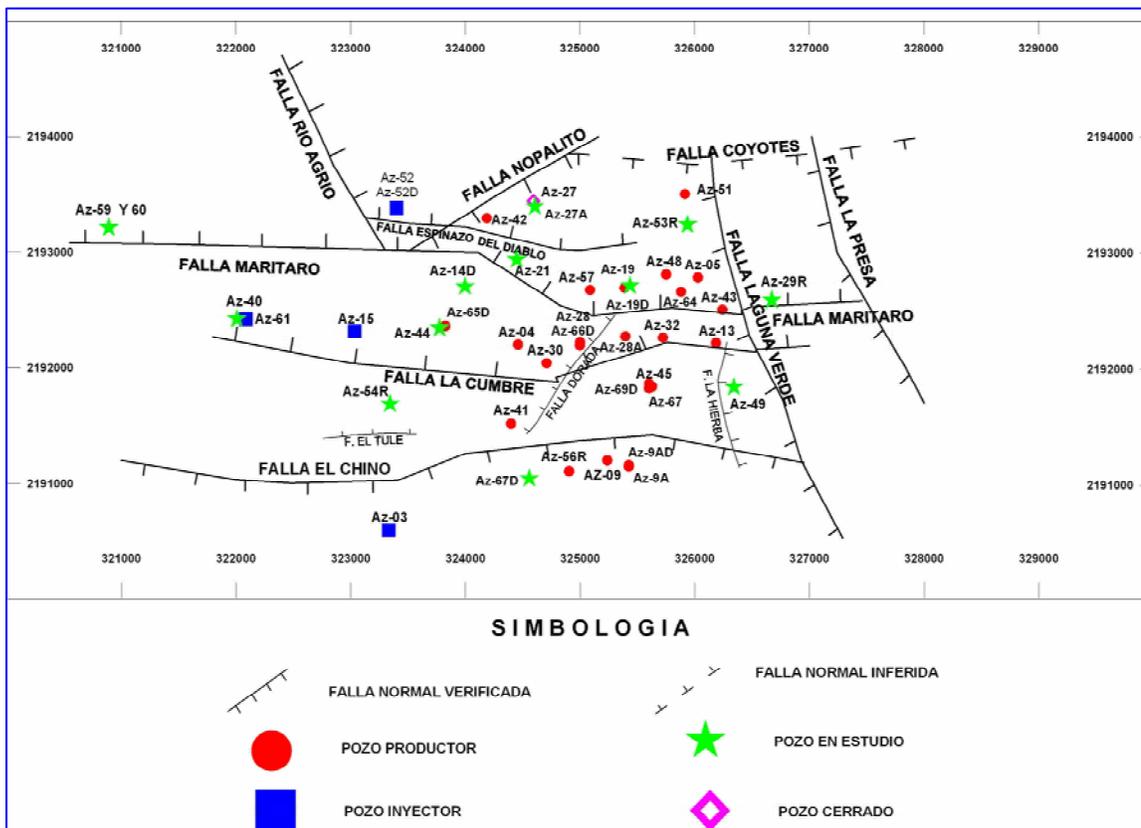


Fig. 1. Área de interés en Los Azufres para este estudio.

Antes de este estudio existían indicios de que al menos parte de lo inyectado podría recargar la zona Marítaro-La Cumbre del yacimiento. Arellano *et al.* (2003, 2005) detectaron algunas correlaciones entre los gastos de algunos pozos productores de esta zona y los gastos inyectados en el pozo Az-15. Barragán *et al.* (2005) y Arellano *et al.* (2005) observaron algunas correlaciones entre la composición de isótopos estables de las salmueras producidas y las inyectadas en el Az-15.

Independientemente de los indicios mencionados, es de gran importancia económica averiguar si la zona Marítaro-La Cumbre del campo puede recargarse desde el pozo Az-15, porque sería muy positivo recargar esta zona del yacimiento para mantener su presión y prolongar la vida productiva de la misma. Para investigar posibles efectos de esta inyección sobre el yacimiento (por ejemplo, recarga, mantenimiento de la presión, interferencia térmica, etc.) la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE encargó a la Gerencia de Geotermia (GG) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) el diseño, implementación y análisis de una prueba de trazadores en la zona Norte del campo geotérmico Los Azufres.

2. Método y materiales

Se escogieron seis pozos productores en el área Marítaro-La Cumbre para este estudio. Sus nombres, distancias al pozo Az-15 y producciones respectivas se presentan en la Tabla 1.

Pozo	Distancia al pozo Az-15 (m)	Agua (t/h)	Vapor (t/h)
Az-65D	793.45	70.44	37.70
Az-41	1,577.58	0.00	13.08
Az-04	1,430.59	29.25	38.18
Az-30	1,696.94	0.00	21.25
Az-28	1,965.20	11.75	70.62
Az-66D	1,966.48	0.00	35.08

Tabla 1. Distancias al pozo inyector y producción de los pozos monitoreados

Cinco de estos pozos y el inyector Az-15 se localizan en el graben delimitado por las fallas Marítaro y La Cumbre (Fig. 1), y uno, el Az-41, en el bloque elevado delimitado por las fallas La Cumbre y El Chino.

Los registros de presión, temperatura y flujo demuestran

que existe sólo una zona de inyección en el pozo Az-15, localizada a 2049 msnm. Los intervalos ranurados de los pozos productores considerados, exceptuando el Az-41 y el Az-28, se encuentran entre 1900 y 850 msnm, significativamente más profundo que la zona de inyección. El Az-41 es un pozo relativamente somero con un intervalo ranurado entre 2561 y 2658 msnm, aproximadamente 500 m por encima de la elevación de inyección. Y el Az-28, un pozo profundo, tiene intervalos ranurados entre 2141 y 1662 msnm y entre 1469 y 1185 msnm, por lo que la parte más somera del intervalo ranurado superior comprende la elevación de inyección.

Nótese que solamente tres de los pozos designados producen líquido, mientras que los seis producen vapor. Por ello, se decidió utilizar dos trazadores en este estudio, uno para trazar la fase líquida y otro para trazar la fase vapor.

Para escoger los trazadores apropiados consideramos los requerimientos usuales: concentración despreciable en fluido del yacimiento, estabilidad química y térmica a condiciones de yacimiento, bajo límite de detección, ecológicamente benigno, logística razonablemente simple, disponibilidad comercial y precio accesible. Un elemento importante para la selección de los trazadores fue la temperatura de yacimiento: en el área de interés es de 280-300° C en la zona profunda predominada por líquido, y menor a menores profundidades (R.M. Barragán, 2005, comunicación privada).

En años recientes varios autores (e.g., Adams, 1995; Adams *et al.*, 2000; Rose *et al.*, 2001; Rose *et al.*, 2002; y otros) investigaron trazadores geotérmicos de fase líquida. La mayoría de los trazadores investigados resultaron térmicamente inestables o marginalmente estables a 300° C. Por lo mismo, nuestras opciones se vieron considerablemente reducidas. Conservadoramente escogimos el compuesto ecológicamente benigno 1,3,6-trisulfonato de naftaleno (1,3,6-tsn) como trazador de fase líquida, por su alta estabilidad química y

térmica (e.g., Rose *et al.*, 2001, 2002), bajo límite de detección, disponibilidad comercial, costo accesible y simple logística de campo. El límite de detección del 1,3,6-tsn es aproximadamente 0.2 ppb por cromatografía de líquido convencional (e.g., Rose *et al.*, 2001).

Los trazadores geotérmicos de fase vapor fueron investigados por varios autores también en años recientes (e.g., Adams, 1995; Adams *et al.*, 2000; Adams *et al.*, 2001). También en este caso muchos de los candidatos considerados resultaron inestables o marginalmente estables a 300° C. Escogimos el gas hexafluoruro de azufre (SF₆), que no es tóxico, ni inflamable, ni corrosivo, como trazador de fase vapor, por su estabilidad térmica a altas temperaturas, estabilidad química a condiciones de yacimiento, bajo límite de detección, disponibilidad comercial, accesibilidad económica y logística de campo relativamente simple. El límite de detección de SF₆, referido al vapor condensado es aproximadamente 0.01 ppt, por cromatografía de gases con detector de captura de electrones.

El 1 de septiembre de 2005, a las 13:02 horas, comenzó la inyección de 94.2 kg de SF₆ en el pozo Az-15. Esta operación duró 12 horas 40 minutos. La concentración media de SF₆ durante la inyección fue de aproximadamente 52 ppm. Ya que la solubilidad del SF₆ a temperatura ambiente es aproximadamente 7 ppm, cerca del 14% de este trazador fue inyectado en solución y el resto como burbujas en el líquido. El 2 de septiembre de 2005, a las 02:05 horas, se inyectaron 200 kg de 1,3,6-tsn disueltos en 1100 litros de agua separada, por lo que la concentración media de 1,3,6-tsn durante la inyección fue de aproximadamente 15,650 ppm. Esta operación de inyección duró aproximadamente 5 minutos. Durante la inyección de los trazadores el gasto de inyección fue de 39.44 kg/s, y su temperatura aproximadamente 30° C.

Los seis pozos productores fueron muestreados con frecuencia decreciente: dos veces por día durante la primera semana, diariamente durante la segunda semana, tres veces por semana por las siguientes siete semanas, dos veces por semana por las siguientes dos semanas, y una vez por semana posteriormente. El muestreo comenzó aproximadamente 13 horas 30 minutos después de completar las operaciones de inyección de los trazadores.

El día 8 de junio de 2006 se suspendió el muestreo por común acuerdo entre CFE e IIE.

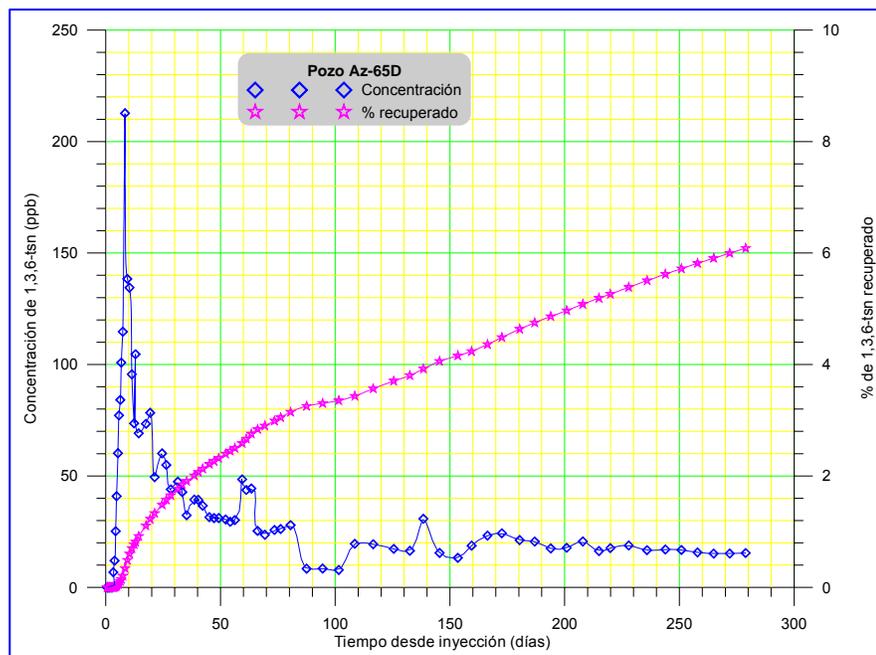


Fig. 2. Curvas de residencia y recuperación de 1,3,6-tsn en el pozo Az-65D

Las muestras de vapor se recolectaron en botellas de vidrio tipo Giggenbach, previamente rellenas con 50 ml de una solución 4N de NaOH, y después evacuadas. Dependiendo de las configuraciones disponibles en los distintos pozos, las muestras de vapor se obtuvieron directamente del vaporducto o del cabezal del pozo, en este caso por medio de un separador transportable. Las muestras de líquido se colectaron en botellas plásticas de 60 ml, en la salida de agua del separador.

3. Resultados y discusión

A continuación se presentan las curvas de residencia y de recuperación de cada trazador en los seis pozos productores, durante los 279 días que duró el muestreo. Los pozos se presentan en orden de distancia creciente al pozo inyector.

3.1 Pozo Az-65D

En el pozo Az-65D, el más cercano al pozo inyector, ambos trazadores llegaron rápidamente, el SF6 en horas y el 1,3,6-tsn en 3.26 días (Fig. 2 y 3), que implica una velocidad máxima de este trazador de 10.14 m/h. Ambos trazadores presentan una serie de picos, que reflejan la conocida naturaleza fracturada de la permeabilidad en este yacimiento. Cada pico se interpreta como el resultado de la existencia de una fractura o “canal” que conduce flujo entre ambos pozos. Como puede observarse, la forma general y los picos en ambas curvas de residencia se correlacionan muy bien. Estas correlaciones y la llegada prácticamente simultánea de ambos trazadores indican que ambos llegaron al pozo productor, o a sus inmediaciones, disueltos en el líquido.

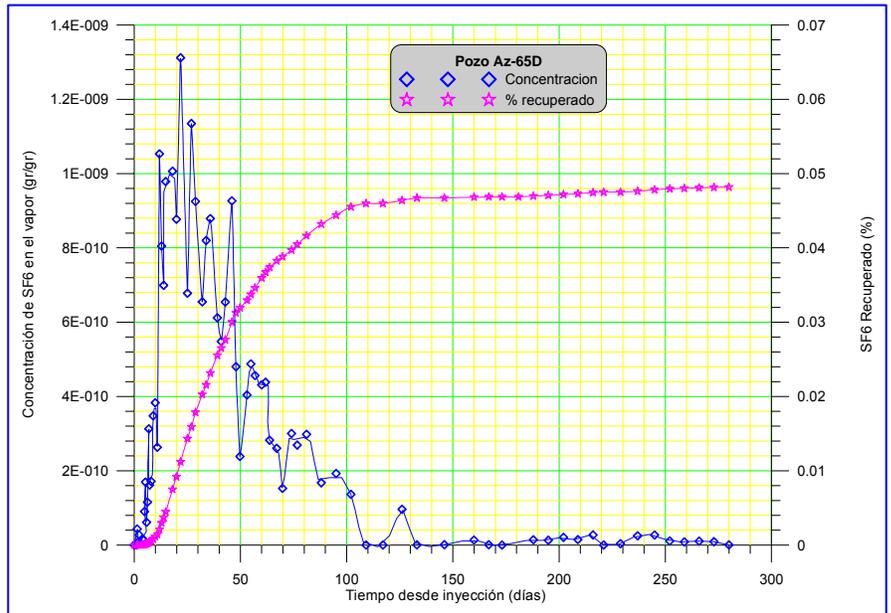


Fig. 3. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-65D.

La recuperación del trazador de fase líquida no se había estabilizado en los 279 días de observaciones disponibles (Fig. 2). La curva de residencia presenta una larga cauda con valores significativos de concentración, a partir de ~65 días (Fig. 2) que sugiere que la salmuera inyectada se dispersa sobre un área considerable del yacimiento. Como al suspenderse el muestreo la recuperación de este trazador crece con un ritmo de $m = 0.0131$ %/día (Fig. 2), la recuperación de 6.1% registrada a los 279 días constituye una cota inferior de la recuperación total que eventualmente se alcanzará en este pozo.

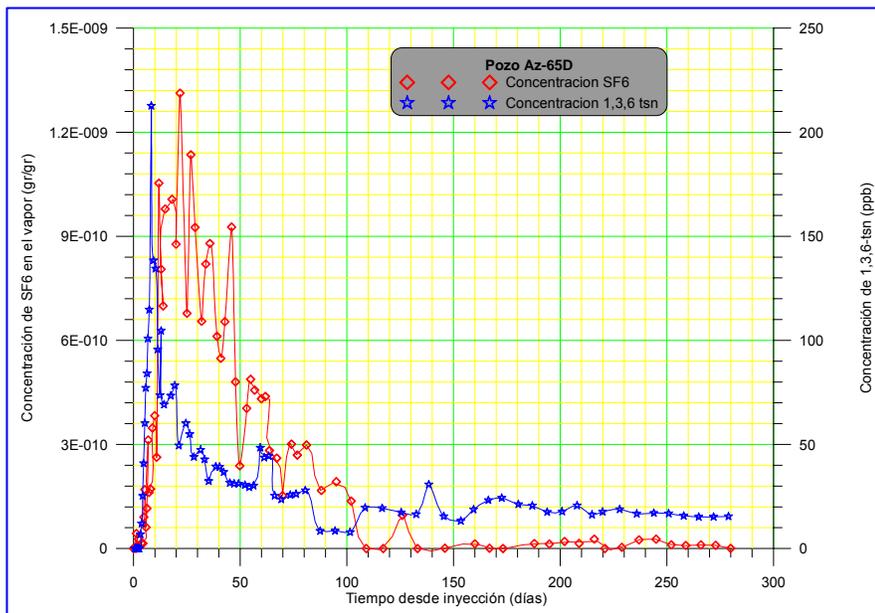


Fig. 4. Comparación de curvas de residencia de SF₆ y 1,3,6-tsn en el pozo Az-65D.

En este pozo la recuperación de SF₆ está prácticamente estabilizada, aunque creciendo muy lentamente, en aproximadamente 0.048% a los 279 días (Fig. 3). Para el mismo tiempo transcurrido, la recuperación de tsn era de aprox. 6.09% (Fig. 4), dos órdenes de magnitud mayor, y creciendo significativamente. En este pozo la recuperación del trazador 1,3,6-tsn es al menos dos órdenes de magnitud mayor que la de SF₆.

A partir de estos resultados, puede concluirse lo siguiente:

- a) La salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-65D.
- b) Esta recarga se efectúa tanto en fase líquida como en fase vapor.
- c) La mayor parte de la recarga se realiza en forma de líquido, y representa como mínimo 6.09% del gasto inyectado.
- d) La recarga por vapor constituye sólo el 0.048% del gasto inyectado.

3.2 Pozo Az-04

En este pozo, segundo en orden de distancia creciente al pozo inyector (Tabla 1), se registró también el arribo de ambos trazadores. A diferencia de lo observado en el Az-65D, en este pozo el tiempo de arribo de ambos trazadores difiere considerablemente. El trazador de fase vapor arribó en horas, mientras que el tiempo de arribo del trazador de fase líquida resultó 45.48 días (Fig. 5), que implica una velocidad máxima de este trazador de 1.31 m/h. Nuevamente se manifiesta la naturaleza fracturada del yacimiento en una serie de picos en las curvas de residencia de cada trazador (Figs. 5 a 7).

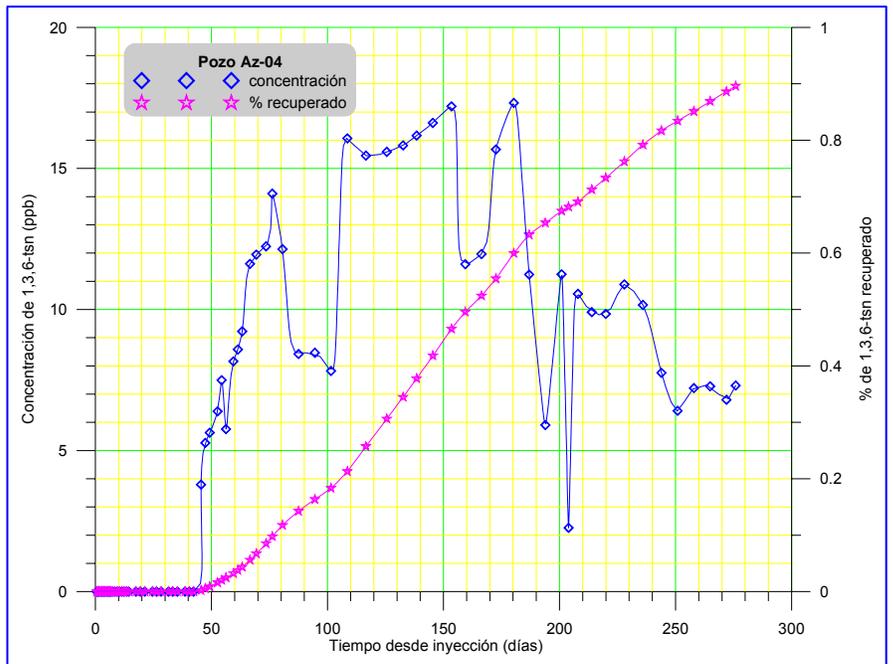


Fig. 5. Curvas de residencia y recuperación de 1,3,6-tsn en el pozo Az-04

En este caso las correlaciones entre las curvas de residencia de ambos trazadores son mucho menos marcadas que en el pozo Az-65D (Fig. 7). Sin embargo, parece existir correlación entre los tres grandes picos que presenta la curva de SF₆ y los picos que registra para tiempos similares la curva de 1,3,6-tsn. Estas correlaciones indican probablemente que los grandes picos de SF₆ se generaron por el arribo de grandes baches de agua, con trazador gaseoso disuelto en los mismos, a través de tres fracturas o “canales” que aportan mayormente líquido.

En este pozo tampoco se había estabilizado la recuperación del trazador de fase líquida al suspenderse el muestreo (Fig. 5). Por lo tanto, la recuperación registrada al suspenderse el muestreo, 0.90% (Fig.

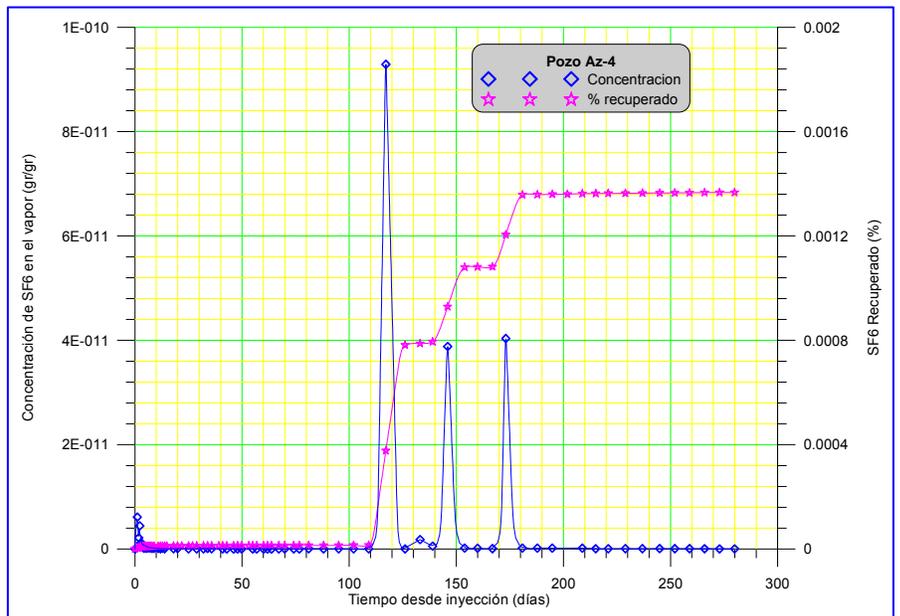


Fig. 6. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-04

5), representa sólo una cota inferior de la recuperación total esperada.

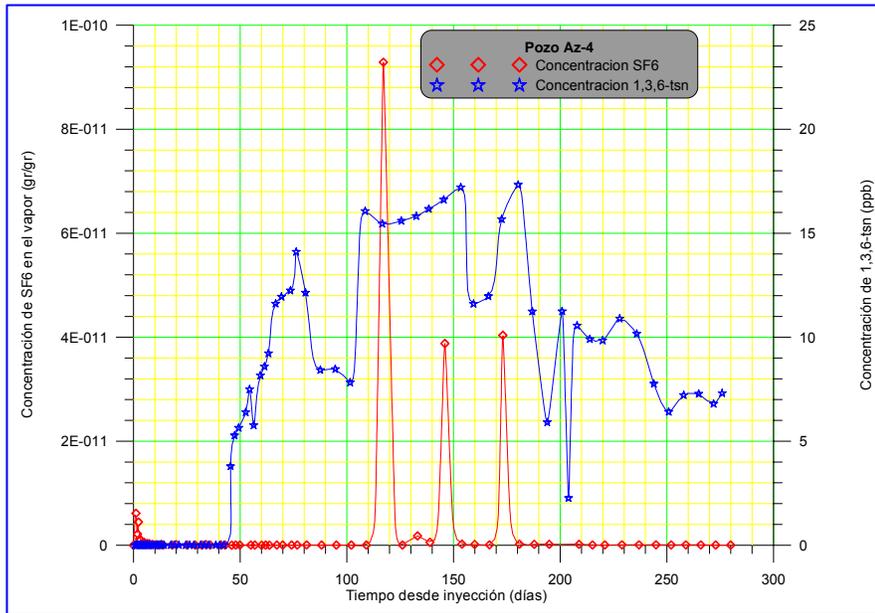


Fig. 7. Comparación de curvas de residencia de SF₆ y 1,3,6-tsn en el pozo Az-04

La recuperación de SF₆ parecía haberse estabilizado en 1.37e-03% al suspenderse el muestreo (Fig. 6).

En este caso el porcentaje de trazador líquido recuperado es también mucho mayor que el de trazador de fase vapor, aproximadamente tres órdenes de magnitud.

De los resultados obtenidos en el pozo Az-04 se concluye que:

- a) La salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-04.
- b) Esta recarga se efectúa tanto en fase líquida como en fase vapor.
- c) La mayor parte de la recarga ocurre en forma de líquido, y representa como mínimo 0.90% del gasto inyectado.

d) La recarga por vapor constituye como mínimo 1.37e-03% del gasto inyectado.

3.3 Pozo Az-41

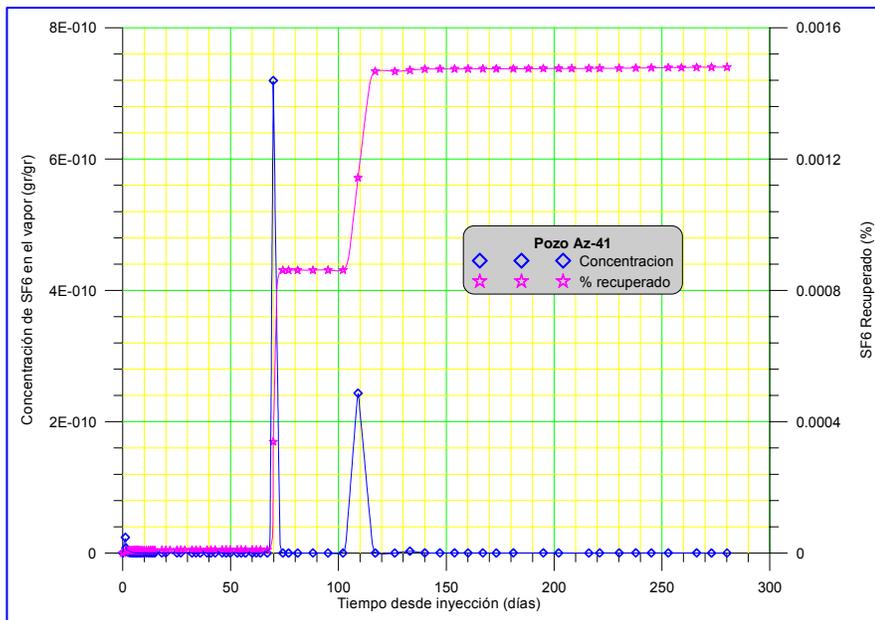


Fig. 8. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-41

Este pozo, el tercero en orden de distancia creciente al pozo inyector (Tabla 1), sólo produce vapor. En los primeros cinco días después de la inyección se registró un pico de SF₆ con un máximo de 2.4e-11 g/g (Fig. 8). A este le siguió un largo periodo en el que continuaron registrándose muy pequeñas concentraciones de SF₆. Posteriormente, a los 70 días después de la inyección se registró un segundo pico con un máximo de 7.2e-10 g/g, seguido de otro lapso en que se registraron muy pequeñas cantidades de SF₆. A los 101 días después de la inyección se registró un tercer pico con un máximo de 2.4e-10 g/g. Este fue seguido a los 130 días por otro pequeño pico con un máximo de 2.0e-12 g/g. Se manifiestan así al menos tres

“canales” que comunican ambos pozos, y una comunicación más difusa asociada con la recepción de las bajas concentraciones de SF₆ durante los largos periodos entre los picos.

Es interesante notar que este pozo, a diferencia del resto de los pozos en los que se registró el arribo de los trazadores, se localiza en el bloque elevado bordeado por las fallas La Cumbre y El Chino (Fig. 1). Antes de este estudio se especulaba que la falla La Cumbre podría actuar como una barrera, impidiendo la recarga del pozo Az-41 desde el inyector Az-15. Los resultados que se presentan en la Fig. 8 prueban concluyentemente que ambos pozos están conectados. Aún si la falla La Cumbre actuara como barrera, la conexión podría ser vía esta falla y después por la falla Dorada (Fig. 1).

Otra particularidad interesante es que el intervalo ranurado de este pozo está entre 2561 y 2658 msnm, aproximadamente 500 m por encima del intervalo de inyección en el pozo Az-15, que se encuentra a 2049 msnm. Los resultados de este estudio comprueban que la salmuera fría inyectada en el Az-15, que por tener mayor densidad que el fluido en el yacimiento tiende a fluir hacia estratos más profundos, ebulle a profundidad y el vapor generado fluye hacia regiones más someras, hasta que eventualmente parte del mismo alimenta al pozo Az-41.

El porcentaje de SF₆ recuperado hasta 279 días después de la inyección parece haberse estabilizado en $1.48e-03\%$.

Las conclusiones para el caso del pozo Az-41 son las siguientes:

- La salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-41.
- Esta recarga se efectúa sólo en fase vapor, que fluye desde profundidades significativamente mayores que la zona de alimentación de este pozo.
- La recarga por vapor constituye como mínimo $1.48e-03\%$ del gasto inyectado.

3.4 Pozo Az-30

Este pozo, el cuarto en orden de distancia creciente al pozo inyector (Tabla 1), sólo produce vapor. En los primeros dos días después de la inyección se registró un estrecho pico de SF₆ con un máximo de $1.6e-09$ g/g (Fig. 9). Esta concentración de SF₆ es la máxima registrada en los seis pozos durante este estudio. Sobrepasa en 19.4% la concentración máxima detectada en el pozo Az-65D, el más cercano al inyector. Después del pico inicial continuó detectándose SF₆, aunque en muy bajas concentraciones, hasta cumplirse 279 días. Los resultados de la Fig. 9 establecen que la inyección en el pozo Az-15 recarga al pozo Az-30.

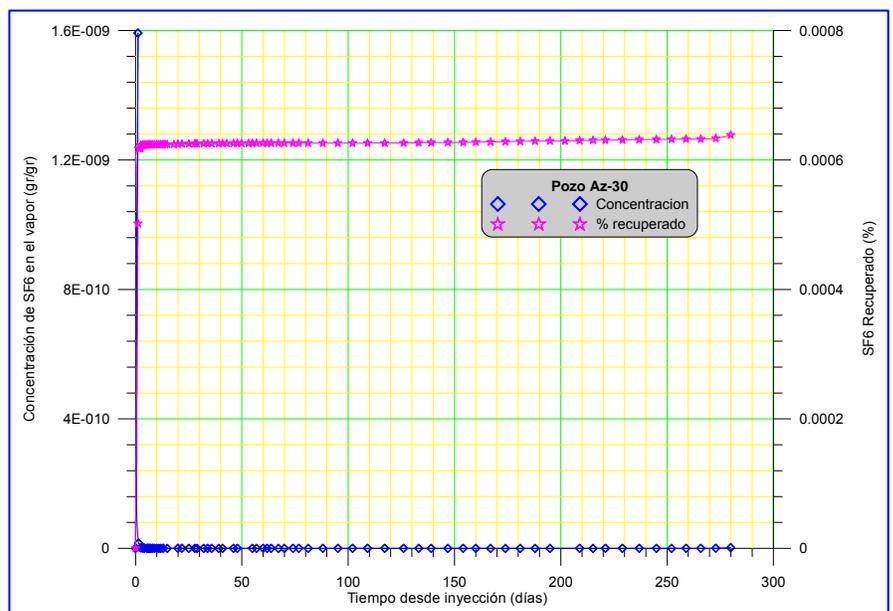


Fig. 9. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-30

Hasta los 279 días después de la inyección la recuperación de SF₆ en este pozo parecía haberse estabilizado, con mínimo crecimiento, en $6.3e-04\%$.

Se puede concluir, por tanto, que:

- La salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-30.

b) Esta recarga se efectúa sólo en fase vapor.

c) La recarga por vapor constituye como mínimo $6.3e-04\%$ del gasto inyectado.

3.5 Pozo Az-28

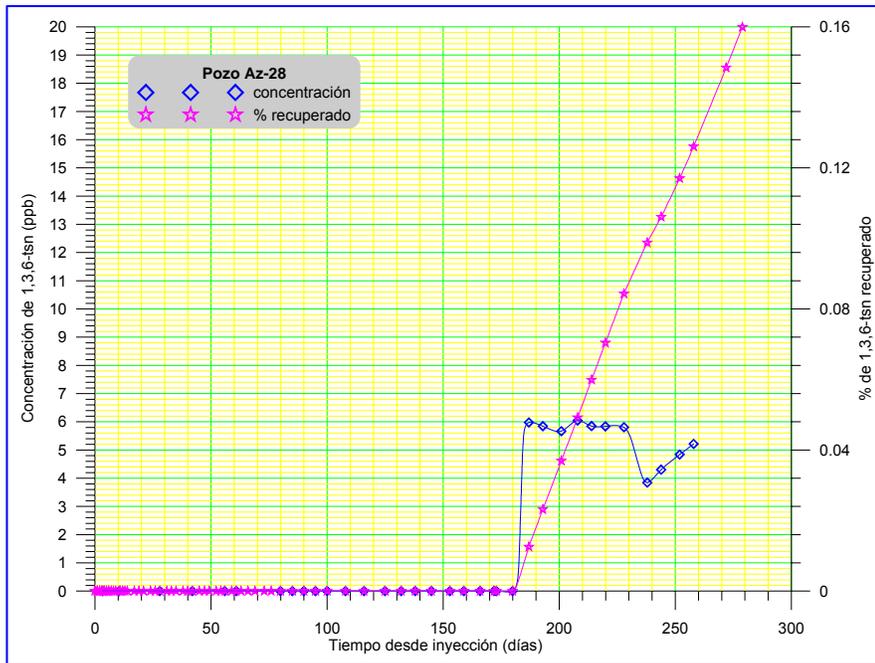


Fig. 10. Curvas de residencia y recuperación de 1,3,6-tsn en el pozo Az-28

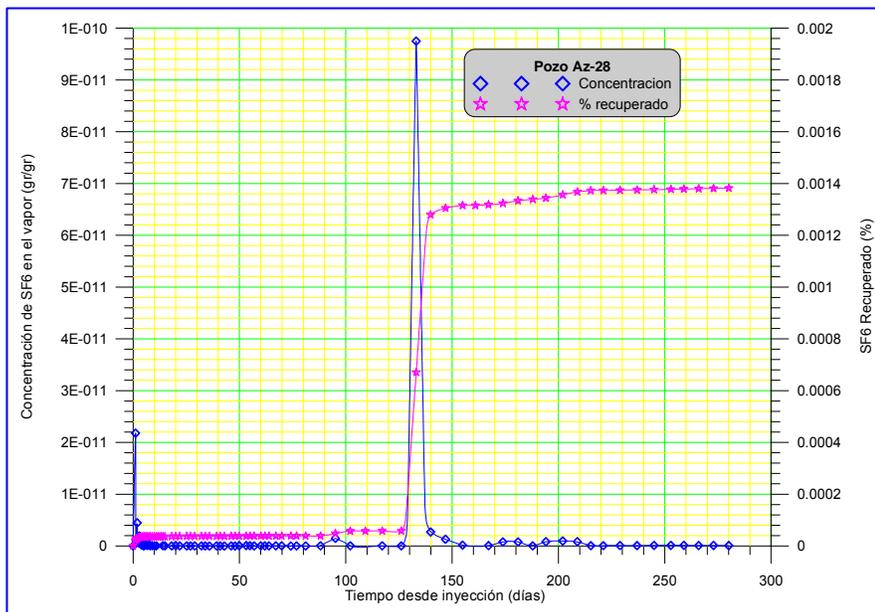


Fig. 11. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-28

Este, el quinto pozo en orden de distancia al inyector (Tabla 1), produce una mezcla agua-vapor. Ambos trazadores fueron detectados en él. Como en el caso del pozo Az-04, en este pozo el tiempo de arribo de ambos trazadores difiere considerablemente. El trazador de fase vapor arribó en horas, mientras que el tiempo de arribo del trazador de fase líquida resultó 186.91 días (Figs. 10 a 12), que implica una velocidad máxima de este trazador de 0.44 m/h. Nuevamente se manifiesta la naturaleza fracturada del yacimiento en una serie de picos en las curvas de residencia de cada trazador (Figs. 10 a 12).

Antes del arribo del trazador de fase líquida se registraron tres picos de SF₆ (Fig. 12), uno horas después de la inyección, el segundo aproximadamente entre 90 y 100 días y el tercero aproximadamente entre 125 y 155 días. Esto sugiere que los mismos arribaron por “canales” predominados por vapor. Las velocidades de arribo de estos picos de SF₆ son significativamente mayores que la velocidad de arribo del trazador de fase líquida, confirmando las observaciones previas de que las velocidades del flujo en “canales” que conducen mayoritariamente vapor son mayores que las del flujo en de los “canales” que conducen líquido.

En este pozo tampoco se había estabilizado la recuperación del trazador de fase líquida al suspenderse el muestreo (Fig. 10). En ese momento la curva de recuperación crecía rápidamente, lo que indica que la recuperación continúa siendo significativa después de los 279 días. Por lo tanto, la recuperación registrada al suspenderse el muestreo, 0.16% (Fig. 10), representa sólo una cota inferior de la recuperación total esperada.

La recuperación del trazador de fase vapor parecería haberse estabilizado al suspenderse el muestreo (Fig. 11). De cualquier manera, en este pozo se ha recuperado como mínimo $1.38 \times 10^{-3} \%$ del SF_6 inyectado.

En este caso el porcentaje de trazador líquido recuperado parece ser también mucho mayor que el de trazador de fase vapor, aproximadamente dos órdenes de magnitud (Fig. 12).

Con respecto a este pozo, puede concluirse que:

- a) La salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-28.
- b) Esta recarga se efectúa tanto en fase líquida como en fase vapor.
- c) La mayor parte de la recarga se efectúa en forma de líquido, y representa como mínimo 0.16% del gasto inyectado.
- d) La recarga por vapor constituye como mínimo $1.368 \times 10^{-3}\%$ del gasto inyectado.

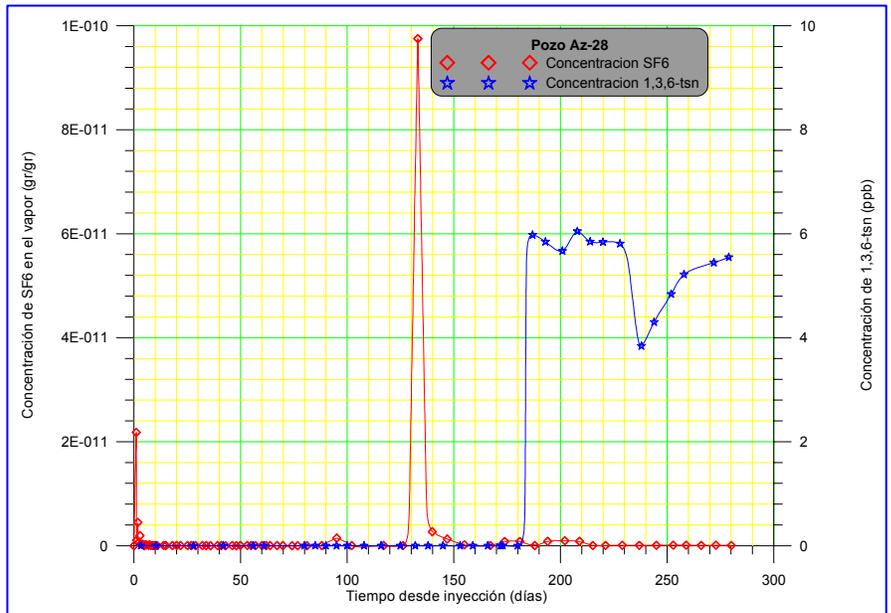


Fig. 12. Comparación de curvas de residencia de SF_6 y 1,3,6-tsn en el pozo Az-28

3.6 Pozo Az-66D

Este pozo, el sexto en orden de distancia al pozo inyector, produce sólo vapor. A pocas horas después de la inyección comenzó a recibirse un pico muy agudo que continuó con una larga cauda de aproximadamente 60 días de duración (Fig. 13). Posteriormente se registraron tres picos más de diversas intensidades, atestiguando también en este caso la naturaleza fracturada del yacimiento. Los resultados de la Fig. 13 establecen que la inyección en el pozo Az-15 recarga al pozo Az-66D.

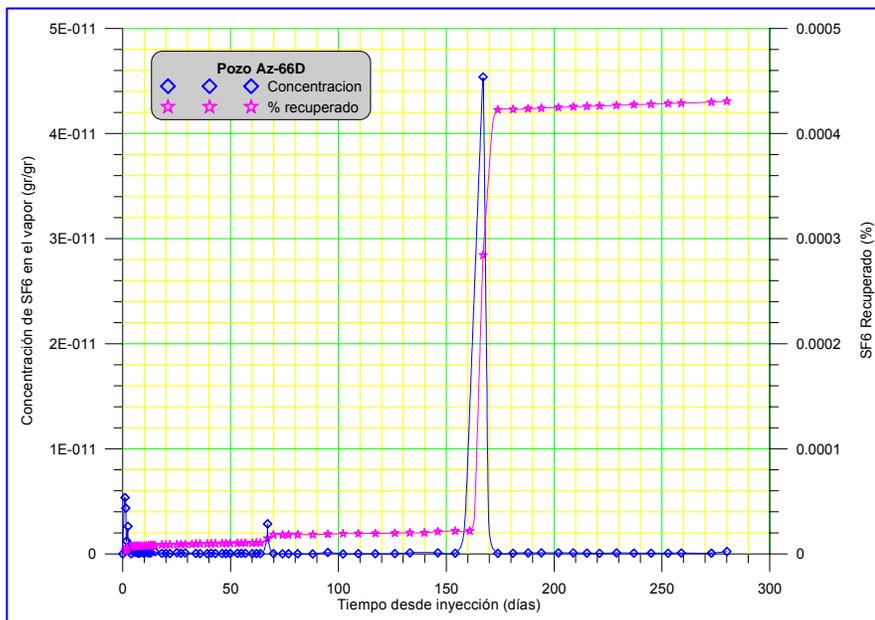


Fig. 13. Curvas de residencia y recuperación de SF_6 en el pozo Az-66D

A los 279 días después de la inyección la recuperación de SF_6 en este pozo había alcanzado $4.31 \times 10^{-4}\%$. La recuperación, aunque lentamente, continuaba creciendo (Fig. 13).

Concluimos que:

- a) La salmuera inyectada en el pozo

Az-15 recarga el pozo Az-66D.

b) Esta recarga se efectúa sólo en fase vapor.

c) La recarga por vapor constituye como mínimo $4.31 \times 10^{-4}\%$ del gasto inyectado.

3.7 Recuperación de 1,3,6-tsn

En la Tabla 2 se resumen algunos parámetros relacionados con los porcentajes de recuperación del trazador de fase líquida en los tres pozos en los que se detectó. Los tiempos de arribo del trazador se incrementan rápidamente con la distancia al pozo inyector. Correspondientemente, las velocidades de arribo disminuyen rápidamente con la distancia al mismo.

Pozo	Distancia (m)	Residencia (días)	Arribo (días)	Velocidad de arribo (m/h)	Recuperación (%)
Az-65D	793.45	278.91	3.26	10.14	6.10
Az-04	1,430.54	275.91	45.48	1.31	0.90
Az-28	1,965.20	278.91	186.91	0.44	0.16
Total					7.16

Tabla 2. Datos sobre el trazador de fase líquida 1,3,6-tsn

Los porcentajes de trazador recuperado en cada pozo que se presentan en la Tabla 2 corresponden a los tiempos de residencia enlistados en la misma. Como hemos visto, en ninguno de los tres casos se ha completado la recuperación del trazador (continuaban llegando cantidades significativas de trazador a cada uno de los tres pozos), lo que dificulta la comparación entre estos resultados. Esto se debe a que en cada pozo el porcentaje de trazador recuperado, que es una función del tiempo desde su inyección, está en una etapa distinta de su eventual recuperación total, en razón de las diferentes características de la estructura de la permeabilidad entre el inyector y el mismo (distancia, número de “canales”, volumen, etc., de cada “canal”). Con los datos disponibles es imposible estimar cuál va a ser la recuperación máxima que se alcanzará en cada pozo, lo que reflejaría la contribución de lo que se inyecta en el pozo Az-15 a la producción de cada pozo.

Mas allá de esta incertidumbre inevitable, el porcentaje total de 1,3,6-tsn recuperado en los tres pozos hasta la suspensión del muestreo es 7.16% , como se muestra en la Tabla 2. Como se discutió previamente, este porcentaje sólo es una cota inferior del porcentaje total de recarga esperado en estos tres pozos por la inyección en el pozo Az-15. En otras palabras, todo indica que estos tres pozos continuarán recibiendo cantidades significativas de 1,3,6-tsn y que los porcentajes de recuperación del trazador en cada pozo crecerán significativamente, con lo que el porcentaje total de recuperación también lo hará.

3.8 Recuperación de SF₆

En la Tabla 3 se resumen algunos parámetros relacionados con los porcentajes de recuperación del trazador de fase vapor en los seis pozos en los que se detectó.

En general, los pozos que producen agua y vapor recuperaron, hasta los 279 días después de la inyección, significativamente más SF₆ que los pozos que producen sólo vapor, como se destaca en color azul en la Tabla 3. La excepción es el pozo Az-41 en el que se recuperaron cantidades similares a las correspondientes a los pozos Az-04 y Az-28.

En los pozos Az-65D y Az-04, se observaron correlaciones entre el arribo de picos de 1,3,6-tsn y el de picos de SF₆ (Figs. 4 y 7) que sugieren que fracciones importantes de SF₆ son transportadas por líquido hasta estos pozos o sus inmediaciones. Este no parece haber sido el caso en el pozo Az-28 (Fig. 12).

Pozo	Distancia (m)	Residencia (días)	Recuperación (%)	Agua (t/h)	Vapor (t/h)
Az-65D	793.45	279	4.82 e-02	70.44	37.70
Az-04	1,430.54	279	1.37 e-03	29.25	38.18
Az-41	1,577.58	279	1.48 e-03	0.00	13.08
Az-30	1,696.94	279	6.38 e-04	0.00	21.25
Az-28	1,965.20	279	1.38 e-03	11.75	70.62
Az-66D	1,966.48	279	4.31 e-04	0.00	35.08
Total			5.35 e-02		

Tabla 3. Datos sobre el trazador de fase vapor SF₆

El total de SF₆ recuperado hasta 279 días es 5.35 e-02%. Para el mismo tiempo transcurrido desde la inyección del trazador, el total de 1,3,6-tsn recuperado en los tres pozos que producen agua (ver Figs. 2, 5 y 10) era igual a 7.16% (Tabla 2). Evidentemente, las observaciones hasta el momento revelan que la recuperación porcentual del trazador de fase líquida es aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que la del trazador de fase vapor.

4. Sumario y conclusiones

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) inyecta salmuera residual en la zona norte del campo geotérmico de Los Azufres, en el pozo Az-15. Para investigar los posibles efectos de esta inyección sobre el yacimiento (recarga, mantenimiento de la presión, interferencia térmica, etc.) la GPG de la CFE encargó a la GG del IIE el diseño, implementación, análisis e interpretación de un estudio con trazadores en el campo geotérmico de Los Azufres.

Para ello se inyectaron dos trazadores en el pozo Az-15, uno para rastrear la fase líquida (1,3,6-trisulfonato de naftaleno) y el otro para trazar la fase vapor (hexafluoruro de azufre). La prueba se realizó con éxito, detectándose el arribo del trazador de fase líquida en los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28, mientras que el trazador de fase gaseosa se detectó en los pozos Az-65D, Az-04, Az-41, Az-28, Az-66D y Az-30.

Desde el día de la inyección de los trazadores se tomaron muestras de agua y vapor de los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28 (pozos productores de mezcla) y muestras de vapor de los pozos Az-41, Az-30 y Az-66D (pozos productores de vapor). A partir del 10 de octubre de 2005 se tomaron también muestras del líquido inyectado en el pozo Az-15, para monitorear la posible recirculación del trazador. El muestreo continuó hasta el 8 de junio de 2006, por lo que duró 279 días.

Podemos concluir que la detección del trazador de fase líquida 1,3,6-tsn en los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28, que producen mezcla agua-vapor, y del de fase vapor SF₆ en los mismos y en los pozos Az-41, Az-30 y Az-66D, que sólo producen vapor, ha demostrado fehacientemente que la inyección de salmuera de desecho en el pozo Az-15 recarga la zona de producción de dichos pozos.

En los tres pozos en los que se detectó el trazador de fase líquida continuaban recuperándose cantidades significativas de 1,3,6-tsn al suspenderse el muestreo. Los totales recuperados en los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28 hasta 279 días después de la inyección fueron respectivamente 6.1%, 0.90% y 0.16%, para un total recuperado de 7.61%. Se concluye que estas cantidades representan cotas inferiores para las magnitudes de recuperación esperadas en cada uno de los pozos y para el total recuperado.

En los seis pozos en los que se detectó el trazador de fase vapor, continuaba recuperándose, a bajo ritmo, SF₆ hasta los 279 días después de la inyección. Los totales recuperados en los pozos Az-65D, Az-04, Az-41, Az-30, Az-28 y Az-66D fueron respectivamente 4.82 e-02%, 1.37 e-03%, 1.48 e-03%, 6.38 e-04%, 1.38 e-03% y 4.31 e-04%, para un total de 5.35 e-02%. Se concluye que estas cantidades probablemente representan cotas inferiores para las magnitudes de recuperación esperadas en cada uno de los pozos y para el total recuperado.

Los pozos que producen agua y vapor recuperaron generalmente más SF₆ que los pozos que producen sólo vapor. La excepción es el pozo Az-41 en el que se recuperaron cantidades similares a las correspondientes a los pozos Az-04 y Az-28. El total de SF₆ recuperado hasta 279 días, igual a 5.35 e-02%, es dos órdenes de magnitud menor que el total de 1,3,6-tsn recuperado al mismo tiempo, que ascendió a 7.61%. Estas observaciones sugieren que la recarga por líquido es más importante que la recarga por vapor en los pozos estudiados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE y a las autoridades del Instituto de Investigaciones Eléctricas las facilidades brindadas para la publicación de este trabajo.

Referencias

- Adams, M.C., 1995. Vapor, liquid and two-phase tracers for geothermal systems. *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*, Eds. E. Barbier, G. Frye, E. Iglesias, G. Palmason, pp. 1875-1880.
- Adams, M.C., Y. Yamada, M. Yagi, T. Kondo, T. Wada, 2000. Stability of methanol, propanol, and SF₆ as high-temperature tracers. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*, Eds. E. Iglesias, D. Blackwell, T. Hunt, J. Lund, S. Tamanyu, p.p. 3015-3019.
- Adams, M.C., J.J. Beall, S.L. Eney, P.N. Hirtz, P.M. Kilbourn, B.A. Koenig, R. Kunzman, J.L.B. Smith, 2001. Hydrofluorocarbons as geothermal vapor-phase tracers. *Geothermics*, v. 30, pp. 747-775.
- Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, F. Sandoval, R. Lozada, 2003. Chemical isotopic and production well data analysis for the Los Azufres (Mexico) geothermal field. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, v. 27, pp. 275-279.
- Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, 2005. Thermodynamic evolution (1982-2002) of the Los Azufres (Mexico) geothermal reservoir fluids. *Geothermics*, v. 34, pp. 592-616.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, 2005. Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, δD) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, v. 34, pp. 527-547.
- Rose, P.E., W.R. Benoit, P.M. Kilbourn, 2001. The application of polyaromatic sulfonates as tracers in geothermal reservoirs. *Geothermics*, v. 30, pp. 617-640.
- Rose, P.E., V. Capuano, A. Peh, P.M. Kilbourn, 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.

Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos

Javier Lermo⁽¹⁾, Yanet Antayhua⁽¹⁾, Luis Quintanar⁽²⁾ y Cecilia Lorenzo⁽³⁾

⁽¹⁾Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F. ⁽²⁾Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F. ⁽³⁾Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich. Correo: jles@pumas.iingen.unam.mx

Resumen

Se analiza la distribución en superficie y en profundidad de los sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla (México), durante el periodo 1997-2004. Los datos corresponden a 95 sismos registrados por más de cinco estaciones permanentes y temporales instaladas por la Comisión Federal de Electricidad y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyas magnitudes de duración son menores o iguales a 3.6 Md y profundidades focales que no sobrepasan los 4.0 km. Asimismo, se realizaron mecanismos focales simples y de inversión de tensor de momento, y se comparó el número de sismos registrados por dos estaciones de la red permanente (números S05, S06) con la inyección de agua y la producción de vapor durante cierto tiempo. Los resultados en superficie y en profundidad muestran actividad sísmica en la zona norte del campo, alrededor de los pozos inyectoros I29 (pozo H-29) e I38 (pozo H-38), mientras que los mecanismos focales simples y de tensor de momento evidencian esfuerzos de origen heterogéneo, sugiriendo que parte de la actividad sísmica ocurrida en Los Humeros puede haber sido “inducida” principalmente por el proceso de inyección de agua al subsuelo del campo geotérmico.

Palabras clave: Los Humeros, sismicidad inducida, mecanismos focales, distribución de esfuerzos.

Seismologic study of Los Humeros geothermal field, Puebla, Mexico. Part I: Seismicity, source mechanisms and stress distribution

Abstract

The distribution of earthquakes at the surface and at depth in the Los Humeros geothermal field, Puebla (México), is analyzed from 1997-2004. Data for 95 earthquakes were registered at more than five permanent and temporary stations installed by the Comisión Federal de Electricidad and the Instituto de Ingeniería of the Universidad Nacional Autónoma de México. The duration magnitudes of the quakes are equal to or lower than 3.6 Md and the focal depths do not exceed 4.0 km. Simple focal mechanisms and moment tensor inversions were made, and the number of earthquakes registered by two stations of the permanent network (numbers S05, S06) was compared with water-injection and steam-production volumes over a certain period. The results at the surface and at depth show seismic activity occurring in the northern zone of the field around injection wells I29 (well H-29) and I38 (well H-38); whereas, the simple focal mechanisms and moment tensors demonstrate stresses of heterogeneous origin, suggesting that part of the seismic activity in Los Humeros is probably “induced”, mainly by injecting water.

Keywords: Los Humeros, induced seismicity, focal mechanisms, stress distribution.

1. Introducción

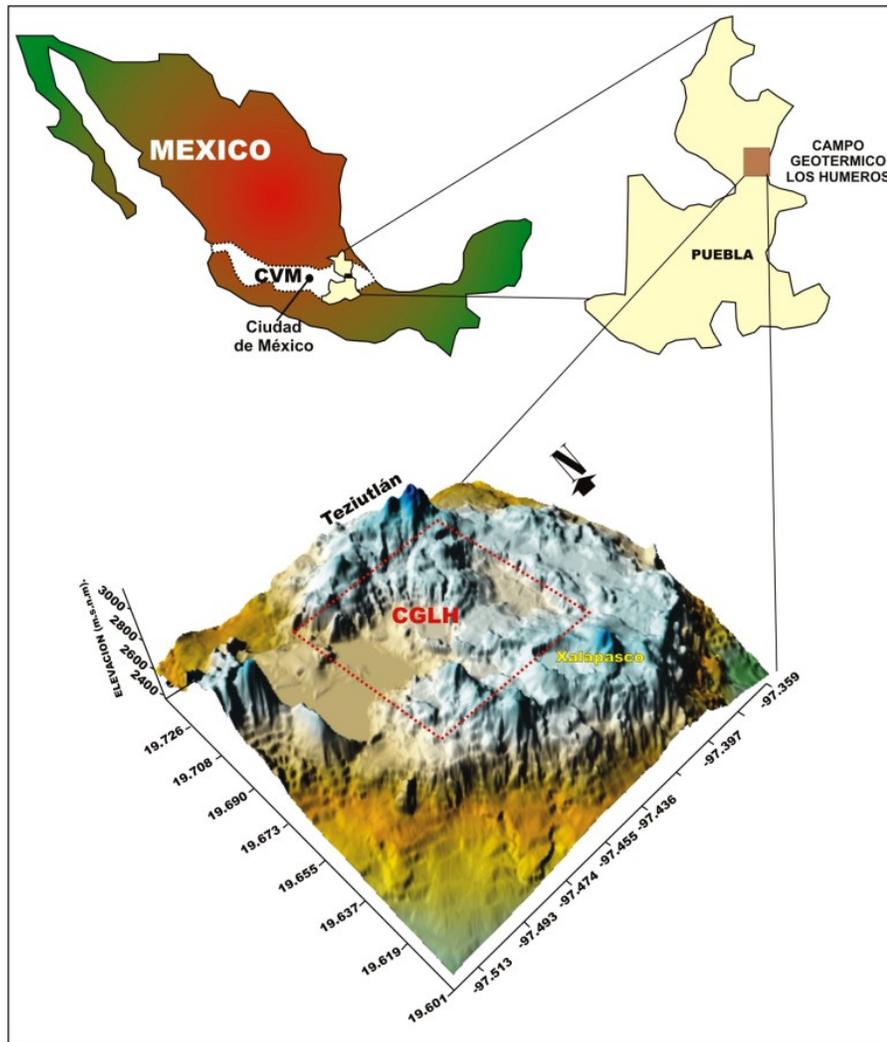


Fig. 1 Ubicación del campo geotérmico de Los Hornos (CGLH).

El Campo Geotérmico de Los Hornos (CGLH) se ubica en el extremo SE del Cinturón Volcánico Mexicano y a 200 km de la ciudad de México (Fig. 1). Los Hornos, al igual que otros campos geotérmicos existentes en México y el mundo, se desarrolló dentro de una caldera volcánica cuya constitución geológica y tectónica hicieron propicio su alto potencial geotérmico (Cedillo, 2000). Desde 1982 hasta la actualidad se han perforado unos 40 pozos entre exploratorios, productores e inyectores con un total de metros perforados de 87,352 (Gutiérrez-Negrín and Quijano-León, 2005), y una capacidad actual de 40 MW en 8 unidades de 5 MW cada una. En general, se ha observado que cuando un sistema natural es sometido a los procesos de inyección y explotación del subsuelo (agua, vapor de agua, gas y petróleo), el estado de esfuerzos puede ser alterado de manera considerable desencadenando a veces una intensa actividad sísmica (Gupta, 2002; Rutledge *et al.*, 2004; Ake *et al.*, 2005).

La importancia del monitoreo sísmico en el campo de Los Hornos se deriva básicamente del sismo del 25 noviembre de 1994 ($M_d=4.6$), el cual ocasionó daños considerables en su infraestructura (Lermo *et al.*, 1999). En diciembre de 1997 la CFE instaló una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) compuesta por 6 sismógrafos digitales triaxiales (S01, S02, S03, S04, S05, S06) y algunas temporales (PNCF, PSCF, CLCF, HUCF, T07, T08, T09) alrededor del campo geotérmico. En el presente estudio se utilizó la información sísmica registrada durante el periodo 1997-2004 proveniente de estas dos redes sísmicas, a fin de analizar la distribución de la sismicidad, conocer los mecanismos de fuente que la generan, el estado de esfuerzos del campo geotérmico y la relación de los sismos registrados en las estaciones permanentes (S05, S06) con los pozos (inyectores, productores) y la tectónica local.

2. Geología y tectónica

La geología del campo geotérmico de Los Humeros ha sido descrita por diversos autores (Pérez-Reynoso, 1978; Yáñez-García *et al.*, 1979; Gutiérrez-Negrín, 1982; Viggiano y Robles, 1988; Cedillo, 2000). El basamento del CGLH está constituido por esquistos y rocas graníticas del Pérmico Tardío al Jurásico Temprano. Cubriendo a estas rocas de manera discordante, aparecen rocas sedimentarias del Triásico-Jurásico, cubiertas a su vez por una secuencia marina del Jurásico Superior al Cretácico Superior, con algunos afloramientos al oeste, este y sur de la caldera de Los Humeros. Sobreyaciendo al basamento descansa una secuencia de andesitas e ignimbritas del Terciario. La primera acumulación de rocas volcánicas ocurrió hace aproximadamente 11 millones de años (Ma) y está constituida por derrames de andesita de hornblenda, cubiertos parcialmente por derrames de andesitas de augita que procederían de los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba (5 Ma).

El vulcanismo más reciente está representado por coladas de lavas ácidas, básicas y rocas piroclásticas que se observan al centro de la caldera de Los Humeros (Figura 2a). El siguiente evento debió ser de tipo explosivo por la gran cantidad de material volcánico expulsado, ocasionando probablemente el vaciado parcial de la cámara magmática y el colapso del techo de la misma, originándose así la caldera de Los Humeros. Posteriormente, se sucedieron una serie de derrames de andesita basáltica y la emisión de grandes cantidades de pómez que cubrieron a la región (0.08 a 0.04 Ma). La fase final de la actividad volcánica del área está representada por derrames de composición basáltica que muestra una estrecha relación con el origen de la caldera del Xalapasco.

Tectónicamente, el CGLH presenta tres estructuras caldéricas, Los Humeros, Los Potreros y el Xalapasco, formadas en los diferentes eventos volcánicos ocurridos en el campo (Figura 2b). Estudios geofísicos de reflexión sísmica (COMESA, 1998), gravimetría (Campos-Enríquez y Arredondo-Fragoso, 1992) y transitorio electromagnético (TDM) (Seismocontrol, 2005) revelaron también la existencia de sistemas de fallas orientados principalmente en las direcciones NW-SE (Malpaís, Antigua, Los Humeros, Nueva, Imán), NE-SW (Pamela, Morelia, Parajes) y E-W (Las Papas). La falla Los Humeros es la única que puede ser observada en superficie y de acuerdo a los estudios de reflexión sísmica estaría conectada en profundidad con el yacimiento. A través de ella ascienden fluidos de alta temperatura hasta la superficie para dar lugar a las manifestaciones termales ubicadas. Asimismo, los análisis estructurales realizados en la falla Los Humeros muestran un movimiento de tipo normal con buzamiento hacia el este (Cedillo, 2000).

La perforación de los pozos en el CGLH permitió la identificación de 9 unidades estratigráficas del subsuelo, así como la definición de dos probables yacimientos geotérmicos, uno superior formado por andesitas e ignimbritas y otro inferior compuesto por andesitas y basaltos que están separados por una capa confinante de toba vítrea (Cedillo, 2000; Arellano *et al.*, 2000). La Figura 2c muestra el perfil estratigráfico representativo B-B' del CGLH, orientado en dirección este-oeste (E-W).

3. Estudios previos de sismicidad

Los estudios de sismicidad antes de la explotación del campo geotérmico de Los Humeros fueron mínimos (Ponce y Rodríguez, 1977); la mayor parte se ha realizado en la etapa de explotación (Lermo *et al.*, 1999; Lermo *et al.*, 2001, Lermo *et al.*, 2002; Lermo *et al.*, 2005). Los resultados de Ponce y Rodríguez (1977) muestran una mínima actividad sísmica local relacionada al campo.

Desde 1994 se cuenta con información sísmica continua, debido a la ocurrencia del sismo del 25 de noviembre de ese año a las 18:52 (hora GMT). Este sismo superficial (2.0 km), fue sentido en las ciudades de Teziutlán y Puebla con una intensidad de III en la escala de Mercalli Modificada (Fernández *et al.*, 1996). Sin embargo, en el campo geotérmico se percibió una intensidad de VIII en la misma escala, ocasionando algunos daños en la infraestructura de CFE (Lermo *et al.*, 1999). Con este antecedente, CFE instaló la red

Los estudios realizados con la información obtenida han permitido observar que desde diciembre 1997 hasta enero de 1999 la sismicidad se concentró principalmente en la zona norte (ZN) del campo geotérmico, es decir, alrededor de los pozos inyectoros I29 (H-29) e I38 (H-38) alcanzando profundidades del orden de 4.0 km. Pero a partir de febrero de 1999 también empezó a registrarse actividad sísmica en la zona sur (ZS) del campo. En general, los sismos se distribuyen a lo largo de la falla Los Humeros, en la cual, precisamente en su parte sur, ocurrió un sismo de magnitud moderada ($M_w = 3.6$) y profundidad superficial (2.0 km) el 21 de enero de 2002. El análisis de los parámetros de fuente de este sismo, realizado por Lermo *et al.* (2002), mostró concordancia con las características estructurales de la falla Los Humeros.

4. Datos y análisis de sismicidad

4.1. Redes sísmicas

La información sísmica utilizada en el presente estudio proviene de dos redes sísmicas instaladas alrededor del campo geotérmico de Los Humeros (Figura 3): una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) y una Red Sísmica Temporal (RST). La primera red fue instalada el 1 de diciembre de 1997 y está compuesta por seis estaciones sísmicas (números S01, S02, S03, S04, S05, S06) las cuales contienen un registrador digital (Altus K2) acoplado a tres sensores de velocidad (Kinematics, Ranger SS-1) de periodo corto (1 s) en sus tres componentes: vertical (Z), norte-sur (N-S) y este-oeste (E-W). La ubicación original de las seis estaciones se conservó hasta febrero de 2002. Posteriormente, fue necesario reubicar cuatro estaciones (S01, S02, S03, S04) por problemas de robo, ruido y lejanía a la zona de mayor actividad sísmica (T07, T08, T09, T11).

La red temporal (RST) fue instalada durante los meses de julio a octubre de 1999 y todo el año 2000 alrededor de la estación permanente S05 y los pozos inyectoros I29 e I38. Esta red estuvo compuesta por cuatro estaciones de banda ancha (Reftek-Guralp), propiedad del Instituto de Ingeniería (I de I) de la UNAM (números HUCF, PNCF, CLCF, PSCF). Cada una de las estaciones estuvo conformada por un registrador Reftek 72A-08 de 24 bits y un sismómetro de 3 componentes (Z, N-S y E-W) marca Guralp CMG-40T de periodo natural de 30.8 s. Ambas redes tomaron registros con una frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo (100 m/s).

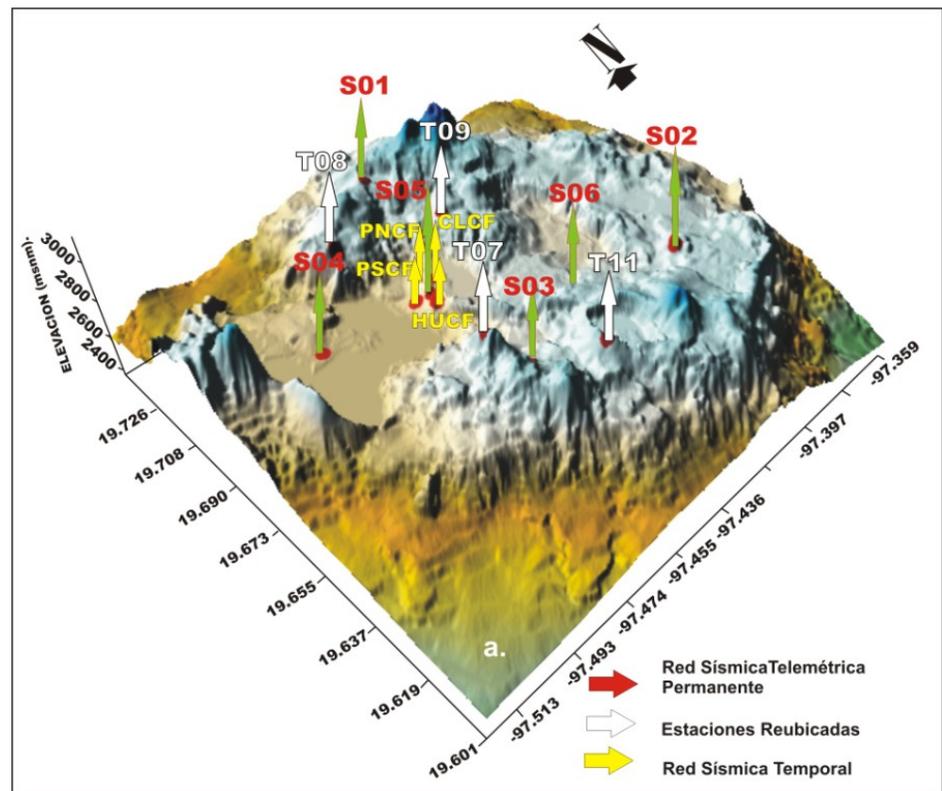


Fig. 3. Distribución de las estaciones sísmicas permanentes, reubicadas y temporales del campo geotérmico de Los Humeros.

En la Figura 3 se presenta la distribución de la RSTP (flechas verdes), las estaciones reubicadas (flechas blancas) y las estaciones de la RST (flechas amarillas).

4.2. Datos

La información sísmica utilizada en este estudio corresponde al periodo de diciembre de 1997 a diciembre de 2004 y proviene de las dos redes sísmicas mencionadas. Durante ese periodo las estaciones sísmicas registraron numerosos sismos locales, de los cuales se seleccionaron 95 sismos registrados en cinco o más estaciones y fases de ondas P y S fácilmente identificables, a fin de optimizar la localización hipocentral de los mismos (Antayhua, 2007).

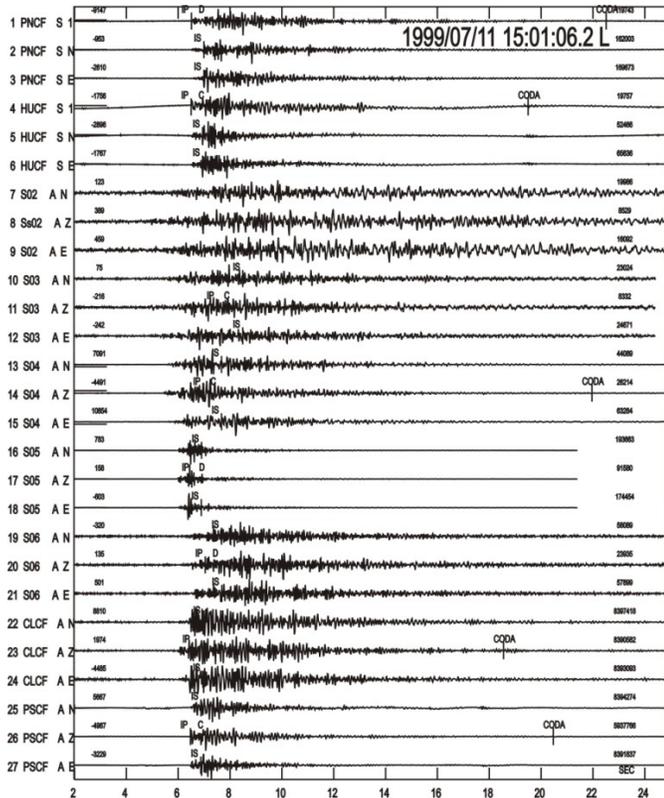


Fig. 4. Ejemplo de sismo registrado el 11 de julio de 1999 ($M_d = 2.2$) en las estaciones permanentes y temporales.

Un ejemplo de sismo registrado por las redes del campo geotérmico se presenta en la Figura 4 y corresponde a los registros del sismo del 11 de julio de 1999. El programa utilizado para su localización es el SEISAN versión 8.0 (Havskov and Ottemoller, 2003). Este programa, al igual que otros, utiliza como datos de entrada los siguientes: nombre de la estación, coordenadas geográficas (latitud y longitud), elevación, la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P (T_p) y S (T_s), la duración total del sismo, una relación de velocidad (V_p/V_s), un modelo de velocidad y una ecuación para el cálculo de la magnitud de duración. En este estudio la lectura de los tiempos de arribo se ha realizado con una precisión de 0.01 s para la onda P y de 0.05 s para la onda S. La relación $V_p/V_s = 1.76$ utilizada para la localización, se obtuvo construyendo la curva de Wadati a partir de los tiempos de arribo de las ondas P y S. Asimismo, el modelo de velocidad corresponde al propuesto por Lermo *et al.* (2000), para el cual se utilizó el perfil de reflexión sísmica realizado por COMESA (1998). La velocidad de la onda P (V_p) y la profundidad equivalente de 9 estratos de los que está compuesto el subsuelo de Los Humeros (Tabla 1) fue obtenida siguiendo la metodología descrita por Dix (1995). La

ecuación de magnitud de duración corresponde al propuesto por Chavacán *et al.* (2004), donde:

$$M_d = -1.61947 + 2.336177 \log_{10}(T) + 0.00052(D),$$

siendo M_d la magnitud de duración en grados corregida a partir de la ecuación propuesta por Lee *et al.* (1972), T la duración total del sismo en segundos y D la distancia epicentral en kilómetros.

Profundidad (km):	0.00	0.24	0.65	1.25	1.79	1.93	2.13	2.37	30.00
V_p (km/s):	1.24	1.94	2.85	3.54	3.69	3.90	4.14	5.18	6.00

Tabla 1. Modelo de velocidad obtenido por Lermo *et al.* (2001). V_p es la velocidad de la onda P.

Los resultados muestran incertidumbres de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) menores de 1 km (Figura 5b), profundidades focales que no sobrepasan los 4 km y magnitudes de 0.8 a 3.6 M_d . Estas características en profundidad y magnitud de los sismos ocurridos en Los Humeros fueron observadas también por Lermo *et al.* (2002, 2005).

4.3. Sismicidad

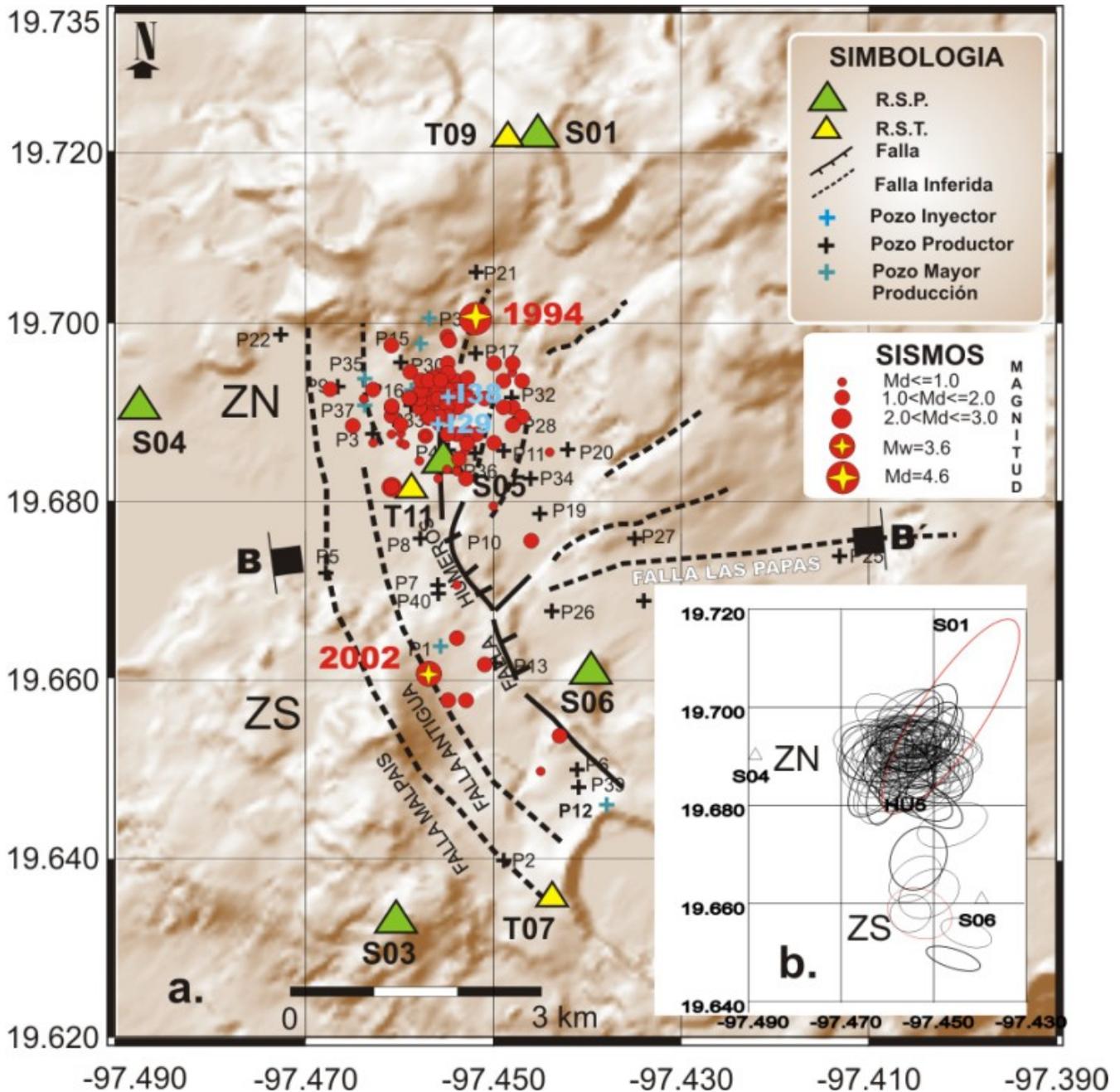


Fig. 5. a) Distribución epicentral de los 95 sismos seleccionados en el estudio. B-B' es el perfil sísmico orientado en dirección E-W. b) Elipses de error de la localización epicentral del total de sismos. Las elipses en color rojo representan epicentros con errores entre 1 y 2 km en su localización.

En la Figura 5a se presenta la distribución en superficie de los 95 sismos seleccionados, además de sus elipses de error (Figura 5b). Puede verse que los sismos se distribuyen principalmente en la ZN del campo geotérmico y muy pocos en la ZS. Asimismo, la mayor concentración parece observar en y alrededor de los pozos inyectores I29 e I38, y al norte de la falla Los Humeros. Justamente al norte de esta falla se ubica el epicentro del ya mencionado sismo del 25 de noviembre de 1994 que causó algunos daños a la infraestructura del campo. Al sur de la falla Antigua se localiza el sismo del 21 de enero del 2002. Ambos sismos, el de 1994 y el de 2002, son hasta la fecha los de mayor magnitud ($M_d=4.6$ y $M_w=3.6$) ocurridos en Los Humeros. Las elipses de error de la localización de los epicentros aparecen en la Figura 5b, correspondiendo las de color

negro a epicentros localizados con un error menor de 1 km y las color rojo a epicentros con error en su localización entre 1 y 2 km.

La distribución en profundidad de esos 95 sismos seleccionados se presenta en el perfil estratigráfico B-B', orientado en dirección E-W (Figura 6). En este perfil representativo del campo geotérmico de Los Humeros, se observa que la mayoría de los hipocentros se localiza entre los 2 y 4 km de profundidad y tienden a concentrarse entre la traza de las fallas Antigua y Los Humeros. Muchos de ellos tienen profundidades focales mayores que la profundidad total de los dos pozos inyectoros (I29, I38), y se ubican dentro del paquete de rocas sedimentarias (calizas). El yacimiento geotérmico está contenido en las rocas andesíticas que sobreyacen a las calizas, y usualmente estas han sido consideradas rocas con muy baja permeabilidad. Por lo tanto, la ubicación de los sismos en esas calizas sugiere un probable fracturamiento de esta capa por la presión ejercida por los procesos de inyección y producción, lo que podría llevar a incrementar su permeabilidad por lo menos en esa zona.

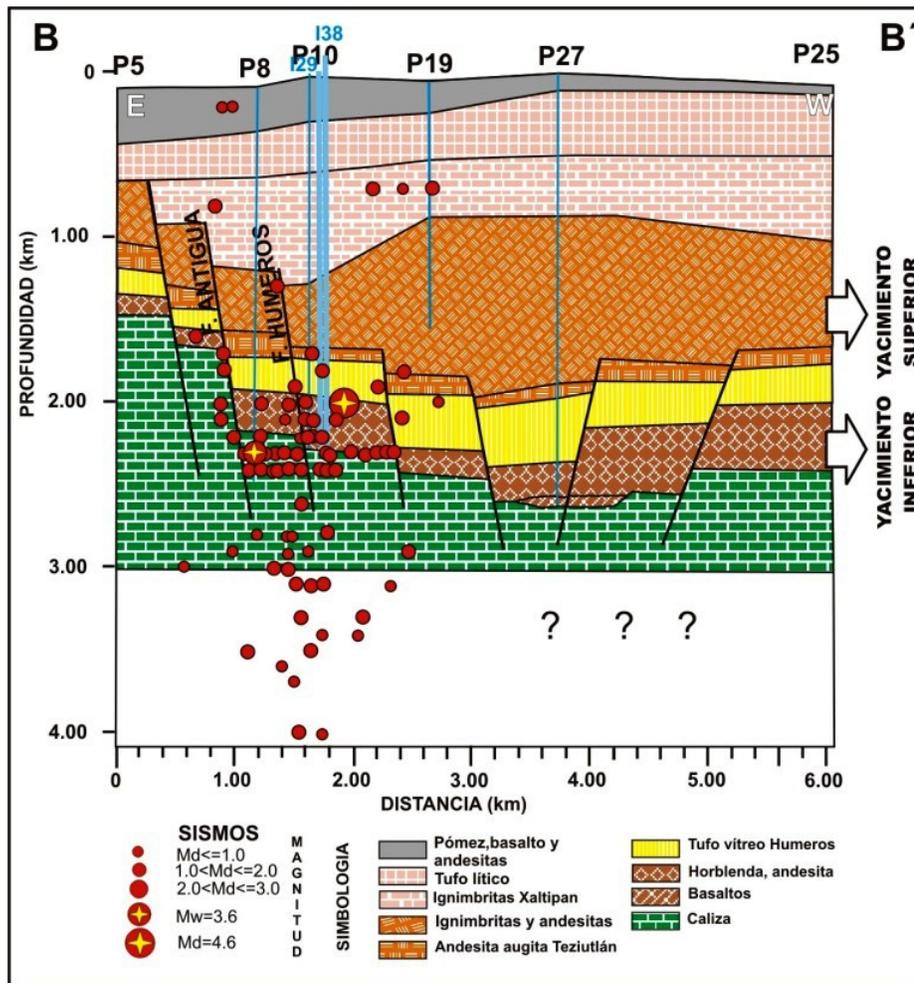


Fig. 6. Distribución de los sismos en profundidad sobrepuesta en el perfil estratigráfico (B-B') del campo de Los Humeros.

esfuerzos tienen fuentes diferentes.

De los 95 eventos seleccionados, 28 fueron registrados en cinco o más estaciones y la polaridad de la onda P fue de tipo impulsivo; para esos 28 eventos se obtuvo la solución de los mecanismos focales simples. Para ello se siguió la metodología descrita por Reasenberg and Oppenheimer (1985) y la opción "focmec" del programa de procesamiento SEISAN (Havskov and Ottemoler, 2003). En la Figura 8 se muestran mecanismos focales simples obtenidos para 8 sismos. Los mecanismos con polaridad C y D están

5. Mecanismos de Fuente

5.1. Mecanismo focal simple

Para obtener los mecanismos focales simples y de tensor de momento, se analizó primero la polaridad de la onda P registrada en la estación S05 (la más cercana al agrupamiento sísmico), debido a que durante el periodo de estudio (diciembre 1997 a diciembre 2004) los sismos se registraron de manera intercalada con polaridades compresionales (C) y dilatacionales (D). En la Figura 7 la dirección de las flechas en color amarillo representa las polaridades C y D. Debido a esa intercalación de polaridades, es probable que el esfuerzo generado en el campo se deba a fuentes diferentes, aunque podrían existir otras explicaciones. En este trabajo, los mecanismos focales simples y de tensor de momento se analizaron considerando que, en efecto, los

representados con barras en color café y azul, respectivamente. Se considera que el plano de falla de los mecanismos sigue la tendencia de las fallas del campo geotérmico de Los Humeros (NNW-SSE aproximadamente), pero las soluciones de los mecanismos no muestran concordancia con las fallas. Por el contrario, corresponden a diversos tipos de fallamientos: transcurrancia lateral derecha, lateral izquierda, normales e inversos con pequeñas componentes de transcurrancia. Esta heterogeneidad en el tipo de falla podría estar asociada con los procesos de inyección de agua y de producción de vapor.

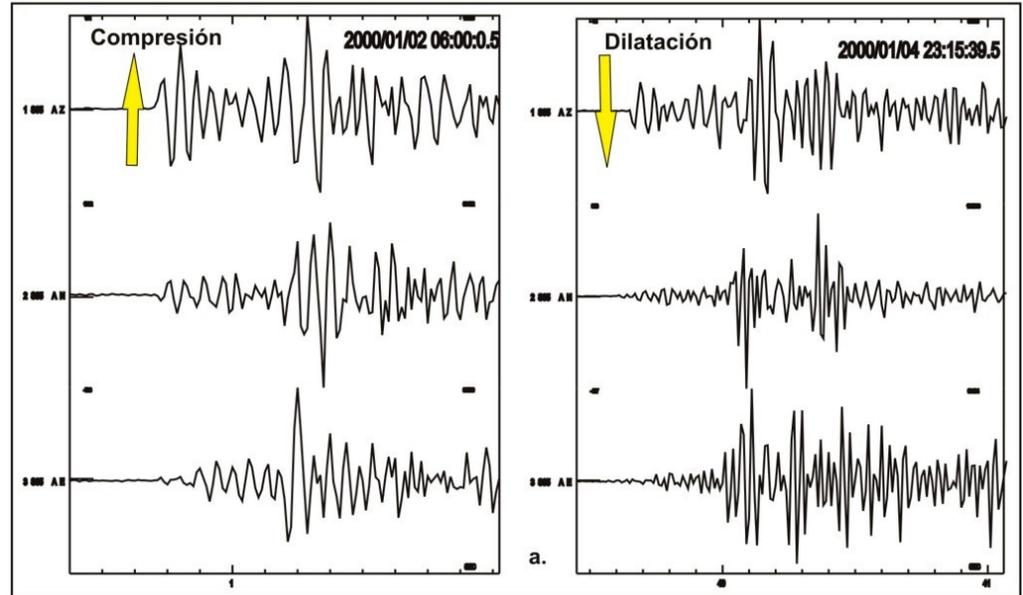


Fig. 7. Ejemplos de sismos registrados en la estación S05 con polaridad compresional (lado izquierdo) y dilatacional (lado derecho) durante enero del año 2000.

5.2. Mecanismo de tensor de momento

Básicamente, los mecanismos focales simples obtenidos para 28 de los 95 eventos seleccionados han permitido conocer los parámetros de los planos de falla (azimut, buzamiento y ángulo de desplazamiento). Pero existe otro método para conocer esos mismos parámetros, que es la inversión del tensor de momento. Este método, a diferencia del anterior, invierte las formas de onda utilizando las funciones de Green, que son generadas a partir del modelo de velocidades de la zona de estudio, el cual explica la propagación de las bajas frecuencias.

El programa utilizado para la inversión es el de Dreger (2002), en el que la representación general de la fuente sísmica se asume como una fuente puntual en el espacio y tiempo según la relación:

$$U_n(x, t) = M_{ij} G_{nij}(x, z, t),$$

en la que: U_n es la componente de desplazamiento observado, G_{nij} es la componente de las funciones de Green para especificar las orientaciones del par de fuerzas, M_{ij} es el tensor de momento sísmico escalar que describe la magnitud del par de fuerzas, ij son las direcciones geográficas. En esta distribución únicamente el tensor de momento desviatorio es resuelto utilizando mínimos cuadrados. Así, M_{ij} es descompuesto en M_0 , tensor de momento de doble par de fuerzas, y un vector lineal de compensación del tensor de momento (Jost y Herrmann, 1989). Para realizar la inversión el programa requiere de los parámetros hipocentrales, coordenadas geográficas de las estaciones, modelo de velocidad en espesores, además de un filtro adecuado para obtener las bajas frecuencias del sismo. La calidad de la solución de la inversión se muestra de manera gráfica y numérica. El porcentaje de la reducción de la varianza (Var. Red.), de 0 a 100%, define la calidad de la solución, siendo el valor más alto un indicador de la buena calidad del mecanismo de tensor de momento.

En total se invirtieron 34 sismos registrados en 1, 2 y 3 estaciones. Los resultados obtenidos de la inversión fueron los parámetros de la falla (azimut, inclinación, desplazamiento), momento sísmico escalar (M_0), magnitud de momento (M_w), ejes de presión (P) y tensión (T) y calidad de la solución (Var. Red.). Estos resultados para los 34 sismos procesados por este método de inversión del tensor de momento se presentan en la Tabla 2 y en la ya mencionada Figura 8. En esta figura aparecen solamente los 18 sismos procesados que se registraron en más de una estación (ver Tabla 2), 8 de los cuales se comparan con los mecanismos focales simples obtenidos con la polaridad de la onda P.

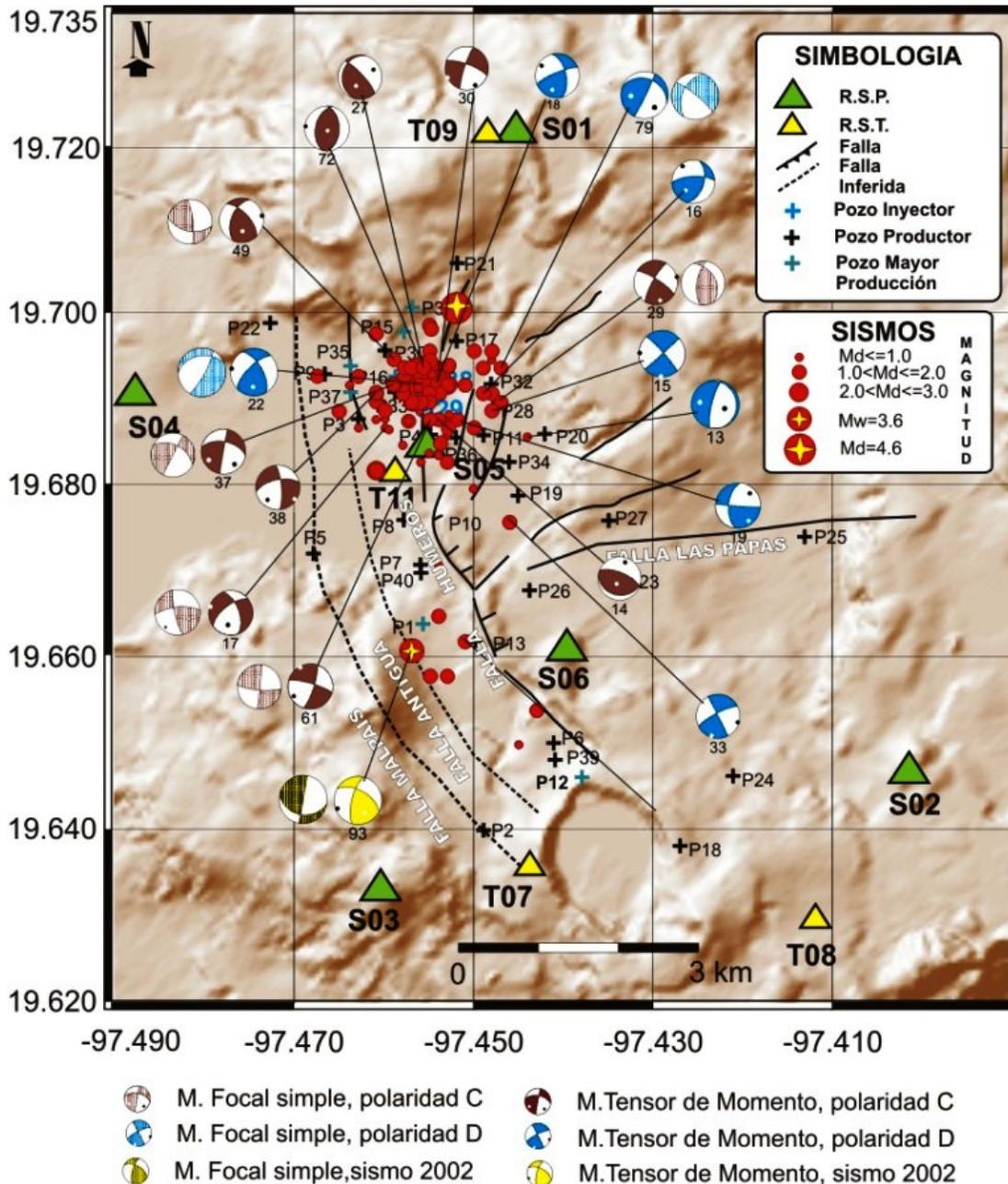


Fig. 8. Distribución de los sismos seleccionados, mecanismos focales simples y de tensor de momento con polaridad compresional y dilatacional. La numeración de los sismos corresponde a los números de la Tabla 2.

Al igual que se observó con las soluciones de mecanismos focales simples, los de tensor de momento presentan una variedad de tipos de fallamientos. En general, los mecanismos que parecen predominar en el campo son de transcurrancia lateral derecha e izquierda, característica similar a lo observado en el campo de gas de Carthage Cotton, Texas (Rutledge *et al.*, 2004). Esto sugiere de nuevo que los esfuerzos causantes de las fallas son heterogéneos y que pueden estar asociados a los procesos de inyección y producción, aunque varios de los sismos tienen seguramente un origen netamente tectónico.

5.3. Estado de esfuerzos

Para conocer el estado de esfuerzos del campo se ha utilizado parte de la información obtenida del proceso de inversión del tensor de momento, es decir, el azimut, el buzamiento y los ejes de presión y tensión de ambos planos nodales (A, B) que aparecen en la Tabla 2. Para representar la distribución de los ejes (T, P) en el perfil estratigráfico orientado en dirección E-W de Los Humeros, se utilizó el programa RAKE (Louvari, 1995). Asimismo, para conocer la orientación preferencial de estos ejes se ha realizado la proyección estereográfica en el plano inferior de Schmidt y en el diagrama de rosas (Antayhua, 2007).

Sismo número	Nº Est.	Azimut (°) A/B	Buzamiento (°) A/B	Desplazamiento	M ₀ (dina-cm)	M _w (°)	Var. Red. (%)	T (°) Az/Buz	P (°) Az/Buz
4	1	92/352	81/14	-129/-39			86	211.4/26.8	326.9/40.4
5	1	274/5	89/83	173/1			93	229.6/10.7	139.4/0.8
6	1	106/16	86/86	176.4			77	331.1/2.8	240.9/2.8
10	1	267/3	77/68	157/14			81	255.6/30.5	161/7.7
13	2	194/342	78/14	-83/-121	6.85x10 ¹⁸	1.9	69	277.8/32.6	113.5/56.4
14	2	292/100	67/24	95/79	8.09x10 ¹⁹	2.6	61	210.9/67.7	18.4/21.9
15	2	48/318	89/84	174/-1	2.42x10 ¹⁹	2.2	53	182.8/4.2	273.2/4.2
16	2	267/17	69/49	135/28	1.45x10 ¹⁹	2.1	45	223/46.4	326.5/12.5
17	2	232/340	63/59	35/148	7.48x10 ¹⁸	1.9	70	286.9/2.6	194.4/43.4
18	2	248/347	78/57	146/15	7.44x10 ¹⁹	2.5	58	201/34.5	302.2/15.8
19	2	94/186	88/56	34/178	2.09x10 ¹⁹	2.2	50	145.1/21	44.5/25.6
22	3	226/329	68/61	149/25	4.74x10 ¹⁸	1.8	34	185.4/37.5	278.9/4.5
24	1	352/243	65/55	39/148			75	211.5/44.7	115.5/6.1
25	1	292/179	61/55	138/37			91	54.2/3.7	148.4/48.6
26	1	228/319	85/84	174/5			89	183/11.5	273.9/4.4
27	2	317/193	78/20	73/145	7.62x10 ¹⁹	2.6	47	206.3/53.9	61.1/30.9
28	1	188/284	81/56	146/11			70	140.7/30	240.3/16.2
29	2	302/209	78/78	13/168	8.47x10 ¹⁸	2.6	65	165.7/18.4	75.3/1.3
30	2	198/290	81/75	16/171	4.22x10 ¹⁹	2.4	51	244.3/2.4	153.7/15.2
32	1	191/286	81/66	156/10			95	144.8/26.8	241.6/13.3
33	2	333/243	89/78	12/179	1.45x10 ¹⁹	2.1	49	198.6/8.5	107.4/8.5
37	2	190/281	89/53	37/179	1.85x10 ¹⁹	2.1	44	241.8/24.2	139/26.2
44	1	314/214	72/62	30/160			81	176.6/33.5	82.2/6.6
49	2	317/202	62/51	45/143	2.36x10 ¹⁹	2.2	67	174.9/50.5	77.3/6.2
54	1	210/313	69/61	31/155			86	263.3/6.0	168.7/37.7
56	1	217/311	81/67	23/170			83	266/10	171.7/23.3
61	2	286/18	78/78	12/168	3.25x10 ²⁰	2.9	53	332.2/1.9	241.7/15.2
72	2	193/359	46/45	100/80	9.67x10 ¹⁹	2.6	44	181.5/82.9	276.1/0.6
75	1	60/165	69/55	142/26			67	18.1/40.4	115.1/8.2
78	1	341/250	89/71	19/179			66	207.1/15.4	114/11.2
79	2	26/290	86/31	59/173	5.5x10 ¹⁹	2.5	42	267.5/40.6	142/34.2
80	1	272/181	89/56	34/178			72	141.9/24.4	41.3/22.2
82	1	203/358	55/38	105/70			61	157.3/74.8	282.3/8.9
93	2	194/299	69/55	142/26	3.22x10 ²¹	3.6	67	152.1/40.4	249.1/8.2

Nº Est. es el número de estaciones utilizadas para la inversión; el azimut, buzamiento y ángulo de desplazamiento de los planos de falla A y B están en grados; M₀ es el momento sísmico en dinas-centímetro y M_w la magnitud de momento en grados; Var. Red. es la reducción de la varianza en porcentaje; T y P los ejes de tensión y presión, de cada uno de los cuales se da su azimut y su buzamiento en grados. La diferencia en color representa a sismos registrados con polaridad de onda P compresional (color negro) y dilatacional (color azul)

Tabla 2. Solución numérica de los planos de falla obtenidos de la inversión del tensor de momento.

En la Figura 9a se presenta la distribución de los esfuerzos de P (flechas de color rojo) y T (flechas de color azul) y se observa que los ejes de presión presentan orientaciones preferenciales NW-SE, en menor medida E-W y escasamente NE-SW. Los esfuerzos tensionales en cambio tienen orientaciones muy variables. Los círculos en color café y azul, diferencian a los sismos de tipo compresional (cuatro) de los de tipo dilatacional (cuatro también) respectivamente. Por otro lado, en el recuadro de la figura (Fig. 9b) se presenta la proyección estereográfica de los ejes de P y T en el diagrama de rosas. Ahí se observa que el esfuerzo máximo principal de presión (eje P) asociado al esfuerzo local, está orientado principalmente en dirección NE-SW, mientras que el esfuerzo mínimo principal (eje T), asociado al esfuerzo regional, se orienta en dirección prácticamente N-S (Antayhua, 2007). Estas direcciones coinciden con la orientación del esfuerzo observado en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano, de acuerdo con Suter *et al.* (1997) y con García-Palomo (2002). Esto implica que sin duda parte de los sismos procesados tuvieron un origen tectónico.

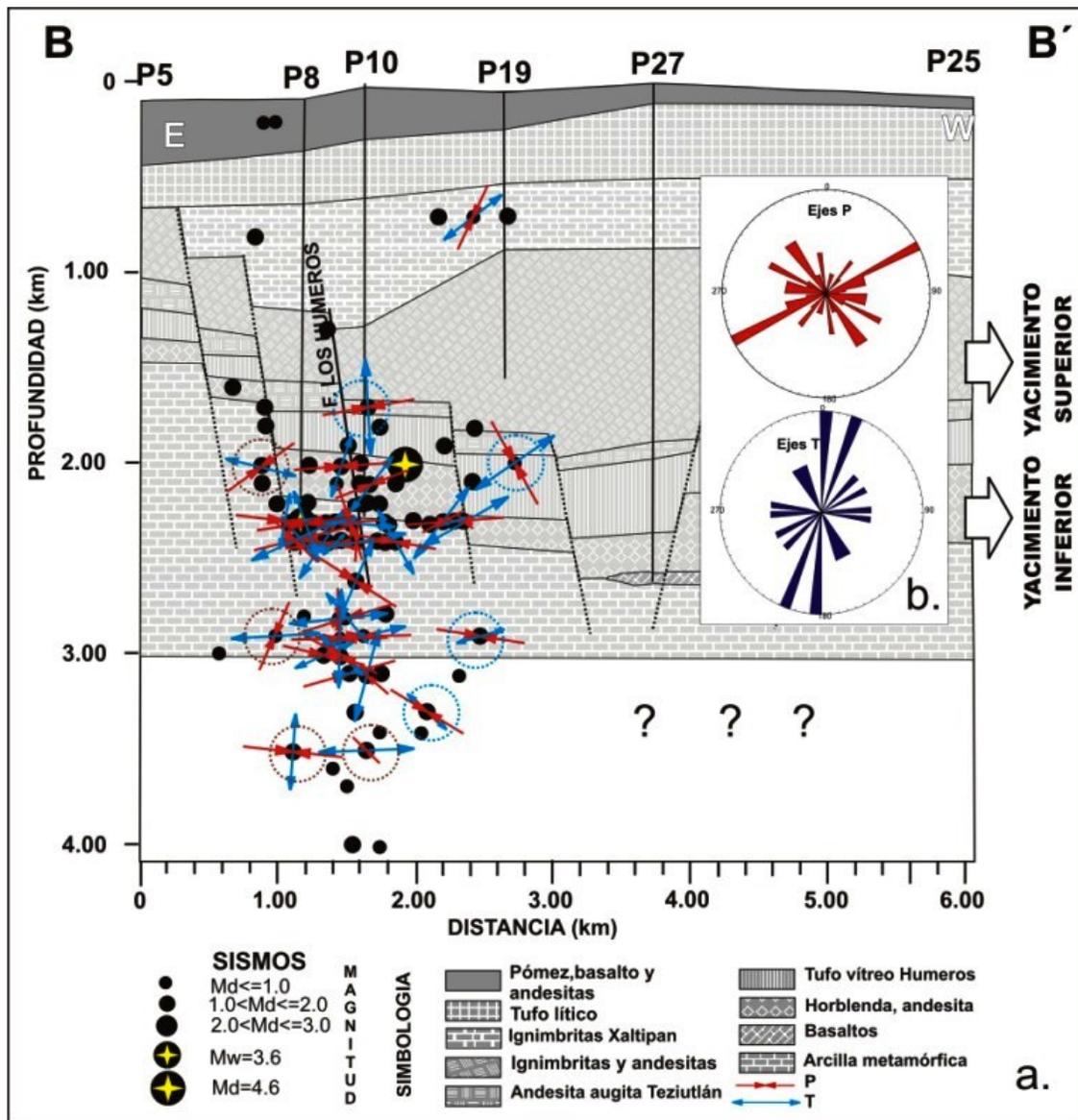


Fig. 9. Distribución en profundidad de los esfuerzos generados en el campo de Los Humeros. Las flechas en colores rojo y azul representan a los ejes de presión (P) y tensión (T), registrados en la estación S05 con polaridad C (círculo café) y D (círculo azul).

6. Relación de los sismos con los pozos y la tectónica local

Para dilucidar si había alguna relación entre el número de eventos, por un lado, y la cantidad de vapor producida y la de agua inyectada, por el otro, se utilizó la información sísmica local registrada en las estaciones S05 (ubicada en la ZN del campo) y S06 (ubicada en la ZS), así como los datos de inyección de los pozos I29 (H-29) e I38 (H-38) y de producción en los pozos que más producen, y que son: P1 (H-1), P-9 (H-9), P12 (H-12), P15 (H-15), P16 (H-16), P31 (H-31), P35 (H-35) y P37 (H-37). Se consideraron como eventos sísmicos locales aquellos cuya diferencia en tiempo de arribo de las ondas S y P era menor o igual a 3.5 segundos ($T_s - T_p \leq 3.5$ s). La elección de las dos estaciones mencionadas se hizo porque se encuentran en una ubicación adecuada y han estado en operación en el mismo lugar desde su instalación original hasta la actualidad. Aunque se dispone de datos sísmicos desde 1997, la estadística abarca únicamente de enero de 1999 a julio 2005.

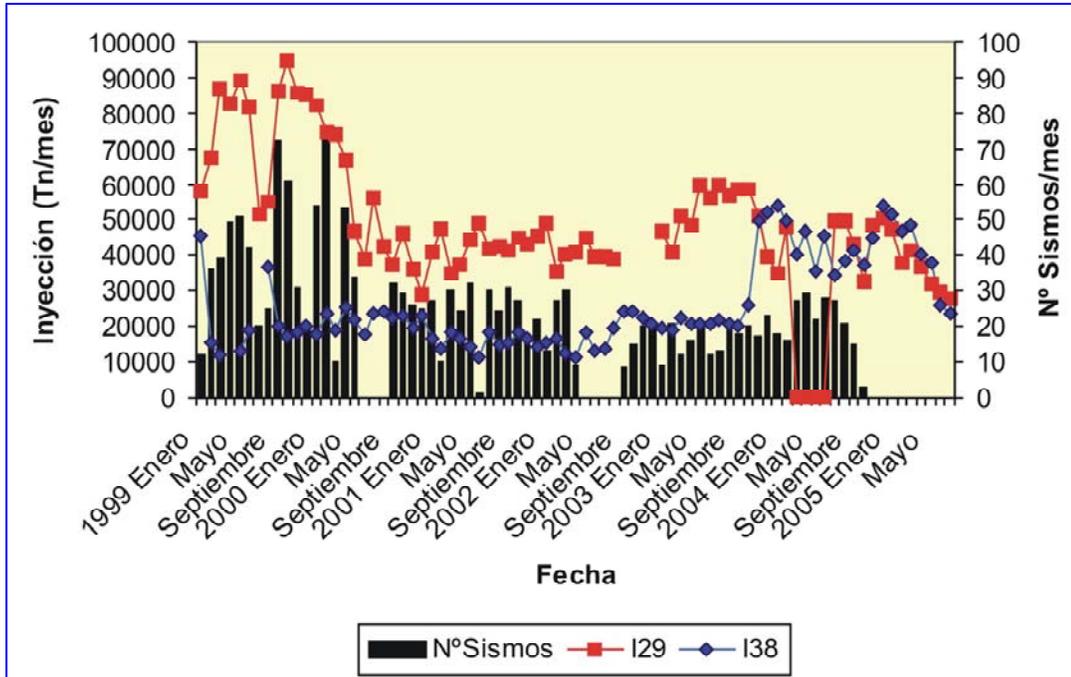


Fig. 10. Número de sismos por mes registrados en la estación S05 y cantidad de agua inyectada en los pozos H-29 (I29) y H-38 (I38) en toneladas al mes.

En la Figura 10 se presenta el número de sismos por mes registrados en la estación S05 y la cantidad de agua inyectada, expresada en toneladas por mes. Puede verse que entre mayo de 1999 y mayo de 2000 a un aumento en la cantidad de agua inyectada en el pozo I29 corresponde un aumento en el número de sismos registrados en esa estación, y viceversa. La correspondencia se pierde entre mayo y septiembre de 2003, ya que el nuevo

incremento en la cantidad inyectada en ese pozo no se refleja en un mayor número de eventos por mes. Pero al aumento en la inyección en el otro pozo I38, ocurrido entre enero y septiembre de 2004, parece corresponder un incremento relativo en el número de eventos registrados, sobre todo entre mayo y octubre.

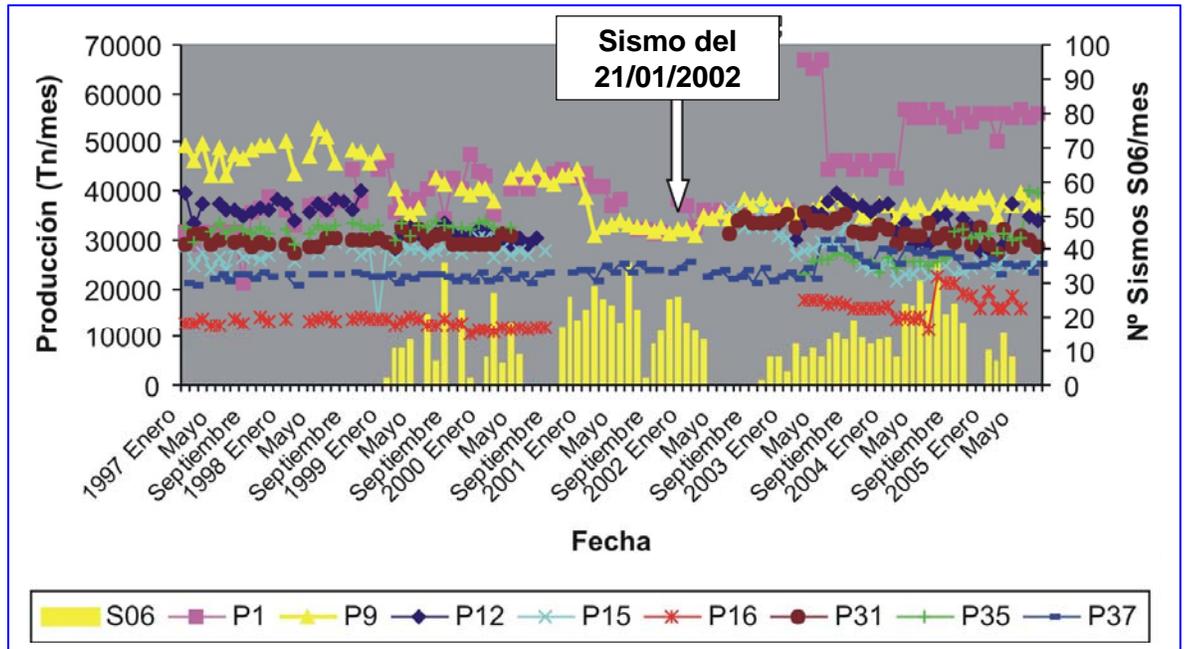
En la Figura 11 se muestra la producción de vapor en los 8 pozos productores mencionados (P1, P9, P12, P15, P16, P31, P35, P37) y la cantidad de sismos registrados en la estación S06. Puede notarse cierta correspondencia entre el aumento en el número de eventos de septiembre de 1999 y mayo de 2000 con un incremento en la producción de los pozos P1 y P9, así como entre el mayor número de eventos registrados aproximadamente entre mayo y septiembre de 2004 y el incremento de la producción de los pozos P1 y P16 que ocurrió por esas mismas fechas. También se indica en la figura la ocurrencia del sismo de magnitud moderada ($M_w = 3.6$) del 21 de enero del 2002.

7. Discusión y conclusiones

La intensa actividad sísmica registrada desde diciembre de 1997 hasta diciembre del 2004 permitió localizar 95 sismos con magnitudes $M_d \leq 3.6$ y profundidades menores a 4.0 km en el campo geotérmico de Los

Humeros. Si se comparan estos resultados con los obtenidos por Ponce y Rodríguez (1977), antes de empezar la explotación del campo, puede concluirse que se pasó de una situación sísmicamente estable a una más dinámica.

Fig. 11. Número de sismos por mes registrados en la estación S06 y cantidad de vapor producida por los pozos productores indicados.



La sismicidad registrada de diciembre de 1997 a diciembre de 2004 tiende a concentrarse en la zona norte del campo, alrededor de los pozos inyectores I29 e I38 y sobre la traza de la falla Los Humeros. En profundidad, los sismos ocurren entre 1.8 y 4 km sugiriendo un intenso fracturamiento y/o microfracturamiento a dichas profundidades. Además, numerosos sismos se encuentran dentro del paquete de rocas sedimentarias, que generalmente han sido consideradas poco permeables. Por lo tanto, es probable que en realidad sí exista permeabilidad por lo menos en su porción superior.

De acuerdo a las soluciones de mecanismos focales y de tensor de momento, en el campo ha ocurrido un fallamiento de tipo heterogéneo, predominando el de transcurrancia lateral derecha e izquierda, similar al observado por Rutledge *et al.* (2004) en el campo de gas de Carthage Cotton en Texas.

La comparación entre el número de sismos registrados en la estación S05 con las cantidades de agua inyectadas en los dos pozos inyectores I29 e I38 sugiere cierta correspondencia entre el aumento en la inyección y una mayor cantidad de eventos, por lo menos en ciertos periodos del total del tiempo que abarcó la comparación.

Por tanto, es posible concluir que al menos parte de la sismicidad local registrada en el campo de Los Humeros ha sido inducida por la liberación de esfuerzos locales debidos a la inyección de agua al yacimiento, lo cual puede estar favoreciendo un ligero aumento en el fracturamiento, y por tanto en la permeabilidad, del paquete de calizas que subyace a las rocas volcánicas que hospedan actualmente a los fluidos del yacimiento. Otra parte de esa sismicidad local tiene un evidente origen tectónico.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Comisión Federal de Electricidad (CFE), a la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, a los ingenieros: Raúl Maya, Magaly Flores,

Saúl Venegas, Jesús Arredondo y Abelardo Vázquez. Asimismo, agradecen las correcciones y sugerencias del Dr. Gerardo García Estrada y del Ing. Luis C.A. Gutiérrez Negrín.

Referencias

- Ake, J., M. Mahrer, D. O'Connell and L. Block, 2005. Deep-injection and Closely Monitored Induced Seismicity at Paradox Valley, Colorado. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 95, No. 2, pp. 664-683.
- Antayhua, Y., 2007. Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros-Puebla (1997-2004), su relación con los pozos y la tectónica local. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México. 136 pp. Inédito.
- Arellano, V.M., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón y A. Pizano, 2000. Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas-Comisión Federal de Electricidad*, 450 pp.
- Campos-Enríquez, O. y J. Arredondo-Fragoso, 1992. Gravity study of Los Humeros caldera complex, Mexico; structure and associated geothermal system. *Journal Volc. Geotherm. Research*, Vol. 49, pp. 69-90
- Cedillo, F. (2000). Hydrogeological model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México. *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan*. May 28-June 10, pp. 1639-1644.
- Chavacán, M., J. Lermo y L. Quintanar, 2004. Determinación de una escala de magnitud para temblores corticales en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano. *Memorias de la I Conferencia Internacional de Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica*, Santiago de Cuba, Cuba, pp. 1-4.
- COMESA, 1998. Informe sismológico final (Vibrosismo). Sísmica 2D. Campo Geotérmico de Los Humeros. Informe RHU-002/98 para la Comisión Federal de Electricidad. Inédito.
- Dix, C.H., 1995. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, Vol. 20, pp. 68-86.
- Dreger, D.S., 2002. Time-Domain Moment Tensor Inverse Code (TDMT_INVC). Version 1.1. University of California, Berkeley Seismological Laboratory (BSL). 18 pp.
- Fernández, S., A. Uribe, J.C. Flores y R. Gómez, 1996. Estudio sismológico en el área del temblor de Xalapa de 1920. *Memorias del VII Simposium de Geofísica y Exploración*, Veracruz, Ver. pp. 365-370.
- García-Palomo, A., 2002. Vulcanismo y geología estructural de la región de Apan, Edos. de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México. Tesis de Doctor en Vulcanología, Universidad Nacional Autónoma de México. 181 pp. Inédito.
- Gupta, K., 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews*, Vol. 58, pp. 279-310.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1982. Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H 1 y H 2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE, Informe interno 23/82, Depto. Exploración. Inédito.

- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., and J.L. Quijano-León, 2005. Update of geothermics in Mexico. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- Havskov, J. and L. Ottemoller, 2003. *SEISAN. The earthquake analysis software. Versión 8.0. Preliminary*. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway. 250 p.
- Jost, M.L., and R. Herrmann, 1989. A Student's guide to and review of moment tensors. *Seis. Res. Lett.* Vol. 60, pp. 37-57.
- Lee, W., R. Bennet, and L. Meagher, 1972. *A method for estimating magnitude of local earthquake from signal duration*. U.S. Geological Survey, Open File Report.
- Lermo, J., J. Guerrero, J. Soto y G. Machorro, 1999. Procesado e interpretación de datos sísmicos de la red sísmológica del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. *Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Veracruz, México, pp. 127-136.
- Lermo, J., J. Soto, C. Lorenzo, H. Mijares y J. Flores, 2001. Estudio de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Fase III. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico DEX-HU-02/01. Inédito.
- Lermo, J., C. Lorenzo, W. Kemper y H. Kemper, 2002. Mantenimiento preventivo y calibración del equipo electrónico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico GF-HU-00/2002. Inédito.
- Lermo J., C. Lorenzo, G. Espitia y Y. Antayhua, 2005. Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Instrumentación y operación de la Red Sísmológica. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico GF-HU-01-05. Inédito.
- Louvari, H., 1995. *Calculate the parameters of the second nodal plane and the parameters of P and T axes. Stress orientation*. University of Thessaloniki, Greece, Geophysical Laboratory, 22 pp.
- Pérez-Reynoso, J., 1978. Geología y petrografía de Los Humeros. *Geomimet*, Vol. 91, pp. 97-106.
- Ponce, L. y C. Rodríguez, 1977. Microearthquake activity associated to Los Humeros caldera, Mexico: Preliminary survey. *Geofísica Internacional*, Vol. 17-4, pp. 461-478.
- Reasenber, P., and D. Oppenheimer, 1985. *FPPFIT, FPPLLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions*. U.S. Geological Survey. Open File Report N° 85-739.
- Rutledge, J.T., W.S. Phillips, and M.J. Mayerhofer, 2004. Faulting Induced by Forced Fluid Injection and Fluid Flow Forced by Faulting: An Interpretation of Hydraulic-Fracture Microseismicity, Carthage Cotton Valley Gas Field, Texas. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94-5, pp. 1817-1830.
- Seismocontrol, 2005. Estudio de resistividad con transitorio electromagnético en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. CFE, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos, Informe GF-HU-08-05. Inédito.

- Suter, C., J. Contreras-Pérez, and H. Ochoa-Carrillo, 1997. Structure of the Sierra Madre Oriental Fold-thrust belt in east central Mexico. *II Convención sobre la Evolución Geológica de México, Pachuca-Hidalgo. Libro guía de las excursiones geológicas*. Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 45-66.
- Viggiano, J.C. y J. Robles, 1988. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Tomo I: Sus usos como indicadora de temperatura del régimen hidrológico. *Geotermia*, Vol. 4, pp. 24-33.
- Yáñez-García, C., S. García-Durán, and J. Casique-Vásquez, 1979. Geothermic exploration in the Los Humeros-Derrumbadas area. *Geothermic Research Count. Trans.* Vol. 3, pp. 801-803.

Reducción del ruido en puntos de desfogue en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Carlos A. Miranda Herrera

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto, Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26.5, Mexicali, B.C. México. Correo: carlos.miranda02@cfe.gob.mx

Resumen

En el campo geotérmico de Cerro Prieto sólo existen silenciadores de vapor en el sistema de regulación de las plantas generadoras, pero no en los sitios de desfogue de vapor a alta presión en los vaporductos (discos de ruptura). Además, los silenciadores de las plantas son muy robustos y su capacidad de reducción del ruido depende de un factor externo no controlable, como es el tamaño del poro de la roca volcánica con el que están contruidos. Por lo tanto, se diseñó un silenciador metálico compacto, económico y relativamente fácil de fabricar, para utilizarse en diversos puntos de descarga de vapor seco a fin de minimizar el ruido. El diseño se realizó con base en las ecuaciones de la placa de orificio. Se construyó un prototipo cuyas pruebas demostraron que es capaz de reducir el ruido hasta en 30 decibeles, al descargar desde la presión de operación de vapor primario hacia la presión atmosférica. Las dimensiones del silenciador pueden ajustarse a las necesidades particulares de cada caso de desfogue.

Palabras clave: Desfogues, discos de ruptura, placas de orificio, ruido, silenciadores, vapor geotérmico.

Noise reduction in steam-vent points at the Cerro Prieto geothermal field, BC

Abstract

Steam silencers have been placed on the power units regulation system of the Cerro Prieto geothermal field, but not where the steam-pipes vent high-pressure steam (rupture disks). Moreover, the power-unit silencers are large and their abilities to reduce noise depend on an external, uncontrollable factor: pores sizes in the volcanic rocks they are made of. Thus a compact, economic and relatively easy to construct metallic silencer was designed to be used at several points of dry-steam venting to minimize the noise. The design was based on orifice-plate equations and a prototype was constructed and tested. It proved capable of reducing noise by 30 decibels for atmospheric discharges of primary steam at operating pressures. The size of the silencer can be adjusted to the particular needs of each vent case.

Keywords: Noise, geothermal steam, rupture-disks, silencers, steam-vents.

1. Introducción

El sonido se propaga en ondas planas progresivas que se mueven a través de un medio elástico, como lo es el aire. La causa física que lo determina es la vibración de este medio, lo cual explica por qué el sonido no se puede propagar en el vacío al no haber un medio continuo por el cual desplazarse (Cuenca y Gómez, 1996; Knapp *et al.*, 2001; Hubner and Wittstock, 2001).

La velocidad de la onda sónica depende de la temperatura y de la densidad del medio, siendo mayor a medida

que estas aumentan. La amplitud indica el nivel del sonido y es directamente proporcional a la frecuencia. Las ondas del sonido, al ir chocando con otras moléculas, van perdiendo energía y se van debilitando hasta desaparecer (Cuenca y Gómez, 1996).

Si el sonido es muy fuerte y no resulta agradable al oído humano se le considera ruido. El oído humano escucha frecuencias de 1000 a 2000 Hertz (Hz) y niveles entre 0 y 120 decibeles (db), siendo 0 el umbral de la audición y 100 el umbral de dolor. Las altas frecuencias están generadas en el rango audible. Los ruidos graves van de 20 a 300 Hz, los medios de 300 a 2000Hz y los agudos de 2000 a 20 000Hz. Con el aumento de la frecuencia disminuye la vibración, pero las pulsaciones de baja frecuencia suelen ser destructivas (Lazalde and Cabtree, 1985; Robert, 1975; Welty *et al.*, 1984).

En el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, existen dispositivos amortiguadores del ruido, llamados genéricamente silenciadores. Hay diversos tipos de silenciadores en funcionamiento, principalmente en el sistema de regulación de las plantas generadoras. Pero no hay silenciadores que amortigüen el ruido que se genera cuando operan los sistemas de seguridad conocidos como discos de ruptura a lo largo de las tuberías conductoras de vapor. Cuando ocurre un exceso de presión en estas tuberías, la presión se libera mediante el rompimiento del disco de alto o bajo rango, generándose también una emisión de ruido, la cual no ha sido debidamente tratada para reducirla hasta niveles inofensivos. Estas zonas de desfogue de vapor a alta presión han estado poco atendidas en lo que a la emisión de ruido se refiere, debiendo tenerse en cuenta que el ruido que provocan los desfuegos de vapor seco es más intenso que el provocado con vapor de baja calidad, es decir vapor con humedad.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es presentar el procedimiento para construir un silenciador de vapor de alta calidad basado en las ecuaciones de placa de orificio, pero adaptado a una placa de orificios múltiples. Este silenciador funciona bajo el principio de reducción de presión para disminuir el ruido provocado por la descarga.

El proyecto incluye el diseño de un sistema para reducir el ruido que ocasiona la liberación de vapor a la atmósfera, por medio de un silenciador de vapor que cumpla con la meta de proteger el oído del trabajador, pero que además satisfaga los requisitos siguientes:

- Capaz de trabajar en condiciones rudas.
- Larga vida útil.
- Alta resistencia a las incrustaciones, al óxido y a las altas presiones y temperaturas.
- Construido con materiales básicos comunes y económicos

Incluye también la construcción de un prototipo y la realización de pruebas iniciales en pozos con diferentes presiones en el campo geotérmico de Cerro Prieto, a fin de instalar eventualmente un silenciador estándar

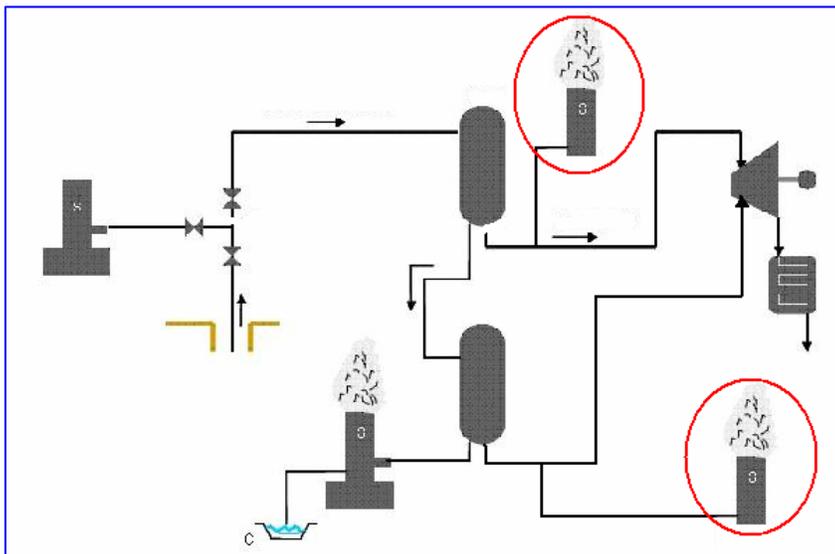


Fig. 1. Instalaciones superficiales en Cerro Prieto

para desfogue de vapor en cada una de las zonas del campo.

En principio, los sitios donde se propone utilizar el silenciador son los discos de ruptura de alto y bajo rango ubicados en los equipos superficiales de las plataformas de los pozos productores y de las islas del campo de Cerro Prieto (Fig. 1).

3. Placas de orificio

Las placas de orificio son más que un pedazo de acero con un agujero en el centro. Son dispositivos de precisión de grado industrial capaces de producir medidas precisas y repetibles.

El diseño propuesto para el silenciador está basado en las ecuaciones de la placa de orificio. La placa de orificio es una placa delgada que puede ser unida entre dos tuberías. Como su geometría es simple, resulta ser de bajo costo y fácil de instalar o reemplazar, además de que el borde filoso del orificio no se incrustará.

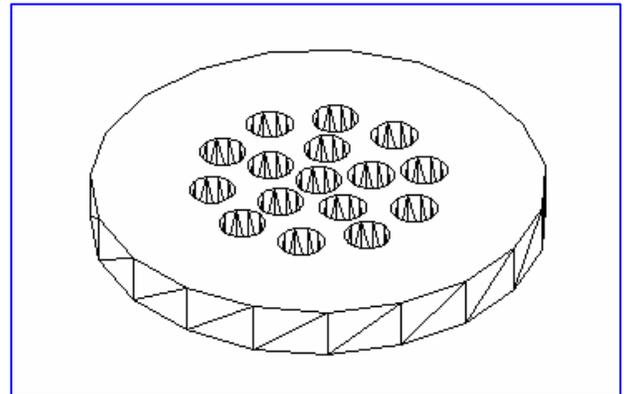


Fig. 2. Placa de orificios múltiples

Ya que el ruido es producido por el choque del vapor a alta presión con la atmósfera, el principio del silenciador es ir reduciendo paulatinamente la presión a lo largo del cuerpo hasta descargar a la presión atmosférica utilizando placas de multiorificio (Fig. 2) para dividir un flujo grande y difícil de manejar en varios flujos pequeños.

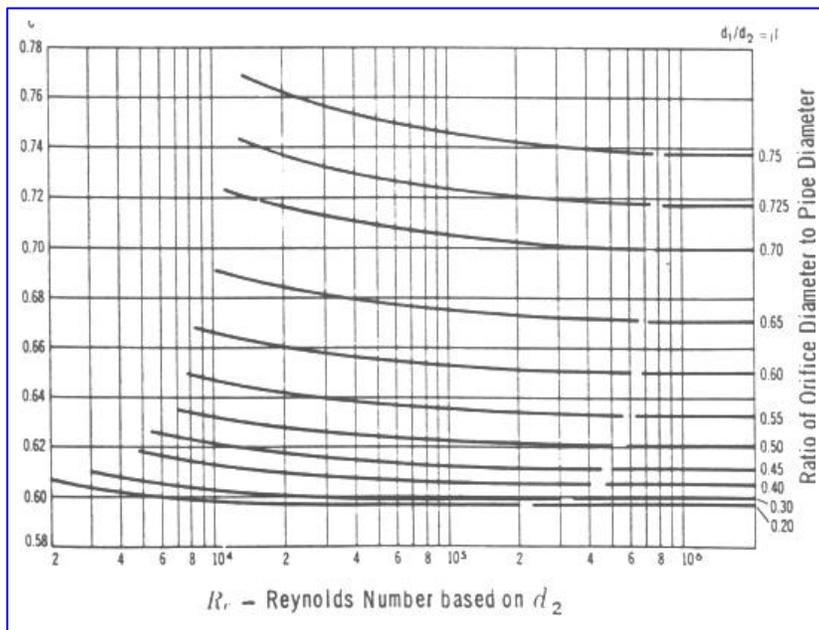


Fig. 3. Obtención del coeficiente de flujo "C" a partir de la relación de orificios β y el número de Reynolds (Tomado de Crane, 1981)

Para el diseño de placas de orificio se requiere conocer la presión que se tiene aguas arriba y el diámetro de la tubería, principalmente para poder definir la relación de orificios β , que es la relación entre el orificio de la placa y el diámetro de la tubería (Crane, 1981).

Con esos datos se puede obtener el coeficiente de flujo C por medios gráficos, a partir de la relación de orificios β y el Número de Reynolds (Fig. 3), lo cual evita la necesidad de calcular la velocidad.

Con base en ello, se obtiene la diferencia de presión en la placa por medio de la ecuación:

$$\Delta P = \left(\frac{q}{YCA} \right)^2 \frac{\rho}{2g * 144} \quad (1)$$

En esa ecuación, Y es el Factor de Expansión Neta, el cual es función de la relación de calor específico k , la relación de orificios β y la relación entre la presión absoluta aguas abajo y la presión absoluta aguas arriba, como se puede apreciar en la Figura 4. Por su parte, A es el área del orificio, g es la gravedad y Q es el flujo

volumétrico (Crane, 1981).

Sin embargo, para la primera iteración se deberán buscar las pérdidas por cabeza h_L en la tubería para encontrar un valor cercano de β y de C por medio de un Valor Constante Mínimo Requerido, $k_{Requerido}$. Al tener este valor, se tratará de acercarse a un valor de β por medio de la ecuación de la Constante del Orificio ($k_{Orificio}$):

$$k_{Requerido} = \frac{2gh_L}{v^2} \quad (2)$$

$$k_{Orificio} = \frac{(1 - \beta^2)}{(C^2 * \beta^4)} \quad (3)$$

Donde v es la velocidad del fluido en la tubería aguas arriba.

El orificio restringe el flujo y entrega un diferencial de presión proporcional al cuadrado del flujo. La placa de orificio universal es de diseño circular, su diámetro exterior es uniforme para la apreciación de presión en cualquier tamaño de tubo.

Al reducir el diámetro se incrementa ΔP . Para condiciones dadas de presión, temperatura, caudal y densidad, se requiere una caída de presión determinada pero se desconoce el diámetro del orificio de la placa. Para ello:

- a) Se selecciona el diámetro de tubo.
- b) Se supone un diámetro de orificio para la placa.
- c) Se calcula el área del orificio.
- d) Con el diámetro del tubo y del orificio se calcula β .
- e) Se obtiene el coeficiente C por medios gráficos (Fig. 3).
- f) Se selecciona Y a partir de C , β y la relación de la presión, para una $k=1.3$ para vapor de agua (Fig. 4).
- g) Se calcula la relación de presiones y la relación crítica de presiones:

$$rp = \frac{(P_2 - P_1)}{P_1'}$$

$$rc = \frac{P_2'}{P_1'}$$

(4)

- h) Con la fórmula corregida de Darcy para placas se calcula ΔP , que debe ser igual a la deseada.

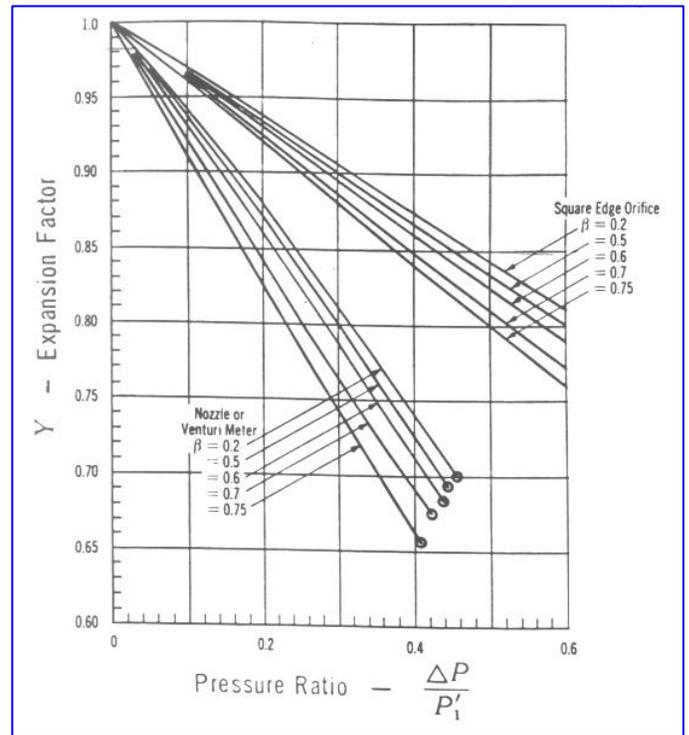


Fig. 4. Obtención del factor de expansión “Y” a partir de la relación de orificios β y la relación de presión, para una $k=1.3$ (Tomado de Crane, 1981)

i) Se calcula la velocidad en el orificio para asegurarse de que esta no llega a la velocidad sónica:

$$v = \frac{q}{A} \quad (5)$$

donde:

v = Velocidad del fluido en el conducto.

A = Área de un conducto.

q = Caudal.

j) Se calcula la velocidad máxima permisible en el tubo, la cual es la velocidad sónica:

$$v_s = \sqrt{kgRT} \quad (6)$$

Una vez que se ha disminuido la presión se tiene que proceder a disminuir la velocidad. La única forma de frenar el fluido es dividiéndolo a través de diferentes conductos que tengan una misma área transversal o haciéndolo pasar por ampliaciones de área.

Cabe hacer notar que la presión no se divide al dividir el flujo. La única forma de disminuir la presión es por medio de restricciones, además de que la presión ya ha sido llevada a los parámetros necesarios por medio del agujero concéntrico en la placa de orificio. El caudal se dividirá proporcionalmente al número de conductos, pero la velocidad no lo hará ya que la velocidad varía de acuerdo a la ecuación 5.

Aunque se reduzca el caudal entre los diferentes conductos, también es necesario disminuir el área de circulación de flujo al restringirlo a los conductos, lo que provocará una nueva aceleración. La velocidad será igual para cada conducto.

La masa se divide equitativamente entre el número de orificios.

k) Una vez realizada la primera iteración se debe verificar que la diferencia de presión en la placa sea la que se desea. Si no lo es, se deberá realizar una corrección de la relación de orificios β hasta llegar a la presión deseada. Todo esto se hará asegurándose de que la velocidad nunca llegue a ser sónica, ya que a mayor velocidad más crítica se vuelve la zona de mezcla en función del choque de los dos medios diferentes (vapor y aire). Si se trabaja cerca del flujo sónico la frecuencia tiende a volverse aguda (Crane, 1981; Streeter y Wylie, 2000; Mataix, 1982).

De esta forma, la placa de orificio debe cumplir con tres condiciones:

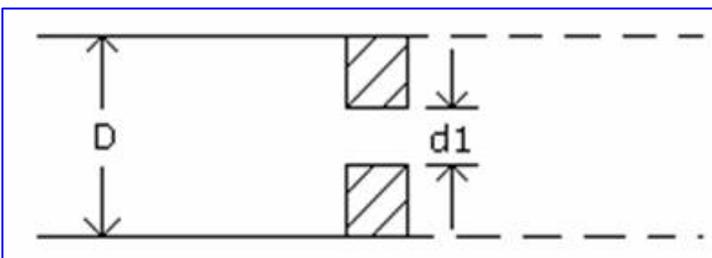


Fig. 5. Bordes de los orificios de la placa

- el fluido nunca debe acelerarse hasta el flujo sónico,
- la caída de presión deseada debe estar dentro de los límites de la relación de orificios β contra coeficientes de flujo C ,
- y la relación de presiones en las caras de las placas nunca debe ser mayor a la seleccionada antes de la primera iteración, ya que al identificar las presiones de entrada y de salida deseadas automáticamente se asignan

propiedades termodinámicas al fluido, propiedades que cambiarán si la diferencia de presión en las caras es mayor.

Para tener un diferencial de presión mayor en la placa, los orificios deben tener bordes afilados a ambos lados de la placa (Fig. 5), a fin de evitar que la presión se recupere.

Con base en la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía no se crea ni se destruye sino sólo se transforma, se puede deducir que la energía potencial (presión del vapor) se transforma en energía cinética (velocidad del vapor) debido a la reducción de área. Esto provoca un campo de distorsión a mayor altura cambiando el ruido de una frecuencia aguda a una grave (menos destructiva).

Además, es importante tener en cuenta los siguientes efectos en la placa:

- La obstrucción o el bloqueo pueden causar errores.
- Los bordes mellados o desafilados introducen un error del 1 al 10%.
- Los dobleces o deformaciones usualmente son resultado de condiciones de flujo que rebasan las condiciones de diseño. Cuando el placa se deforma (Fig. 6) el orificio se agranda (cambia la relación β) y puede producir hasta un 6% de error en el flujo.
- La placa también puede sufrir dobleces o flexiones si se opera justo arriba del punto de diseño, lo que cambia la relación β . El error puede ser hasta del 20%.
- La presencia de desechos y lubricantes en la cara del placa aguas arriba puede producir errores de hasta un 15%, llegando a incrustar la superficie de la placa aguas abajo, lo que contribuye con un 5% de error.

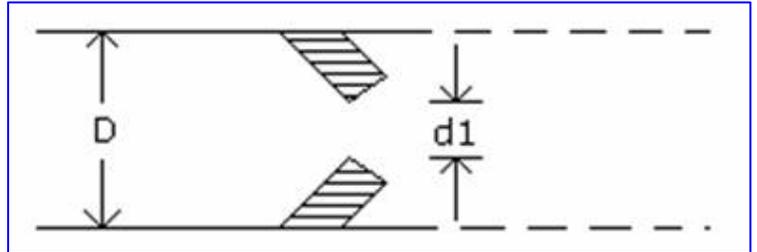


Fig. 6. Deformación de la placa

4. Diseño del silenciador y construcción del prototipo

Los aspectos que se consideraron para el diseño del silenciador son los siguientes:

- El flujo se distribuye uniformemente a través de las placas de orificio.
- Los orificios se consideran independientes uno del otro.
- El sistema se considera isotérmico.
- La densidad del fluido aumenta a la salida de cada placa por la disminución de presión y temperatura del vapor.
- La relación de orificios nunca debe ser tan pequeña que se alcance el flujo sónico.
- Los bordes en ambos lados de las placas deben estar afilados.
- Por la tubería fluirá sólo vapor seco.
- A mayor número de orificios por placa, mayor será la reducción de ruido.
- La distancia entre placas es la que impone la vena contracta (uniformidad del flujo).
- No perforar orificios concéntricos dentro de la placa de orificios múltiples.
- La entrada del vapor al cuerpo del silenciador deberá ser tangencial (Miranda, 2002).

A la salida de cada orificio se creará una especie de vórtice que chocará en forma plástica con los otros vórtices generados por los orificios adyacentes. La fuerza de colisión es proporcional a la aceleración del fluido la cual a su vez está dada por el tamaño de los orificios, de acuerdo a las igualdades siguientes, en las que F es la fuerza, P la presión, A el área, m la masa y a la aceleración:

$$F = P * A$$

$$F = m * a$$

Por lo tanto: $P = ma / A$

Sin embargo, se decidió no tomar en cuenta para los cálculos de diseño esa reducción de presión a la salida de la placa debida al choque elástico del vapor, porque es un valor pequeño comparado con las presiones que se manejan aguas arriba y aguas abajo de la placa.



Fig. 7. Prototipo del silenciador propuesto.

Otro factor que se dejó de lado es la reducción de ruido debido a la humedad y el viento, por no ser factores constantes. Se prefirió utilizar los valores críticos de diseño sin corrección por factores externos, como podría ser una estructura cercana a la ubicación del silenciador que pudiera funcionar como amortiguador.

Adicionalmente, las dimensiones y características críticas son las siguientes:

- El calibre del orificio.
- El espesor del filo del orificio.
- El filo a la entrada del orificio.
- El carácter plano y liso de ambas caras de la placa y de sus superficies (Miranda, 2004).

Bajo esas bases se construyó un prototipo del silenciador en el área de Ingeniería y Diseño de la Residencia General de Cerro Prieto (Fig. 7).

Para su fabricación se utilizaron tubos sobrantes y placas excedentes, sin que fuese necesario adquirir materiales específicos para el efecto. El mismo personal de mantenimiento del campo geotérmico practicó los orificios y realizó las soldaduras, por lo que la inversión total es mínima. Carece de partes móviles y puede augurársele una larga vida útil.

El prototipo se sometió a diversas pruebas, observándose que es capaz de reducir el ruido hasta en 30 decibeles.

Además, se comparó la presión de diseño y la presión real de operación del silenciador, obteniéndose un error de $\pm 0.46662\%$. Esto valida la efectividad de utilizar las ecuaciones de la placa de orificio para el diseño del equipo. La tendencia indica que a mayor número de orificos se estandariza el error lo que permite colocar un factor de ajuste a los cálculos y tener valores más acertados (Fig. 8).

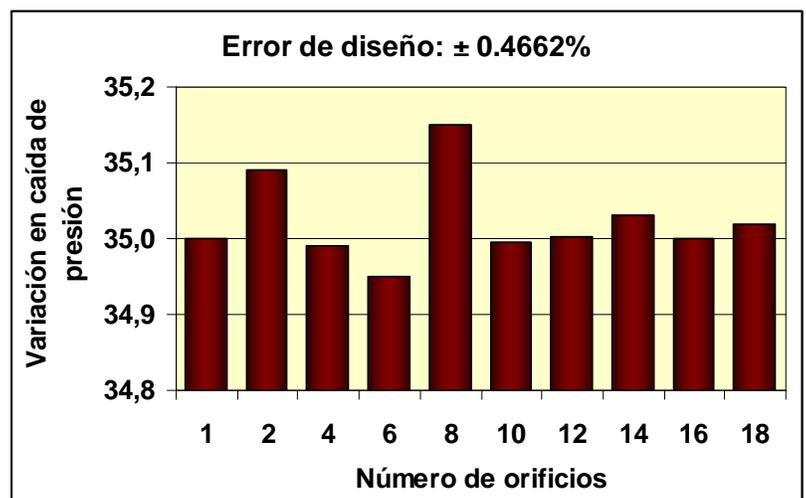


Fig. 8. Comparación entre número de orificios y variación en la caída de presión en la placa

Las condiciones de presión y temperatura varían sustancialmente en las diversas zonas del campo geotérmico, lo que afecta el módulo de elasticidad del acero y el factor de compresibilidad del

vapor, que son factores muy importantes para el desempeño del silenciador. Por ello se propone construir un modelo estándar para cada zona del campo, que responda a sus condiciones particulares.

El silenciador puede fabricarse con las dimensiones adecuadas al espacio disponible en los sitios donde planea instalarse. No hay problemas de diseño para hacerlo. La única limitación de diseño es no poder acercarse a grandes velocidades del vapor, es decir, no tener grandes caídas de presión, lo que limita el número de orificios.

5. Conclusiones y recomendaciones

Se diseñó un silenciador para desfuegos de vapor en vaporductos, con base en las ecuaciones de la placa de orificio. Es un silenciador con placa multiorificio cuyo prototipo se fabricó con materiales excedentes disponibles en el campo geotérmico de Cerro Prieto, y cuyas dimensiones pueden ajustarse al espacio disponible en el sitio donde se instalará. En pruebas realizadas en el campo, el silenciador fue capaz de reducir el ruido hasta en 30 decibeles.

La instalación y uso de este equipo proporcionará mayor seguridad a los trabajadores en el momento de realizar maniobras cerca de los discos de ruptura en vaporductos, lo que a mediano y largo plazo se reflejará en una menor cantidad y gravedad de accidentes de trabajo, así como menos enfermedades e incapacidades por problemas auditivos. Además, reducirá en general la emisión de ruido en el campo geotérmico.

El silenciador también puede utilizarse en sitios de desfogue de las centrales generadoras o en otros campos geotérmicos. Adicionalmente, podría ser sometido a un proceso para obtener su patente y ser eventualmente comercializado por la CFE.

Referencias

- Crane, 1981. *Flow of fluids through valves, fittings, and pipe*. Technical paper No. 410. 20th Printing, Engineering Division of the Crane Company, 122 pp.
- Cuenca, David I., y Juan E. Gómez, 1996. *Tecnología básica del sonido*. Ed. Paraninfo, Madrid, 115 pp.
- Hubner, G. and V. Wittstock, 2001. Investigations of the sound power of aerodynamic sources as a function of static pressure. *Internoise 2001*, Paper Number 685, Session A9-3.
- Knapp, Y., E. Bertrand and A. Buffel du Vaure, 2001. Experimental determination of wave equation source terms for aeroacoustic theories. *Internoise 2001*, Paper Number 444, Session A9-3.
- Lazalde, H. and Crabtree, 1985. Design of steam silencers for geothermal applications. *Geothermics*, V. 14, No. 2/3, p. 335-341.
- Mataix, Claudio, 1982. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ed. Harla, México, 660 pp.
- Miranda Herrera, C.A., 2002. Análisis y diseño de un silenciador de vapor. Tesis de Licenciatura, UABC, Facultad de Ingeniería. Inédito.
- Miranda Herrera, C.A., 2004. Diseño y manufactura de un silenciador de vapor. Tesis de Maestría, UABC, Facultad de Ingeniería. Inédito.

Robert, Josse, 1975. *La acústica en la construcción*. Ed. Gustavo Gili, SA, Barcelona, 291 pp

Streeter, Victor L., y E. Benjamin Wylie 2000. *Mecánica de fluidos*. Ed. McGraw-Hill, México, 9a. edición, 740 pp.

Welty, James R., Charles E. Wicks y Robert E. Wilson, 1984. *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. Ed. Limusa, México, 832 pp.

Modelo de costeo de pozos geotérmicos aplicado para el caso del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Jaime M.E. Vaca Serrano

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, Morelia, Mich. Correo: jaime.vaca@cfe.gob.mx

Resumen

Un proyecto de perforación de pozos geotérmicos puede definirse como una secuencia o sucesión de planes para obtener vapor o fluidos geotérmicos destinados a satisfacer una demanda previamente determinada, que se emplearán principalmente para generar energía eléctrica, bajo las mejores condiciones para obtener un pago. Este trabajo presenta un modelo de costeo para nueve pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto, que fueron perforados entre 2005 y 2006 como parte del suministro de vapor para las plantas generadoras que operan en este campo. El modelo de costeo se basa en el costo por pozo, la producción inicial de vapor, la declinación anual de vapor, los intereses de las obras de perforación y el punto de equilibrio para cada pozo. Los resultados permiten conocer el costo de la tonelada de vapor y el precio de venta para determinar la tasa de descuento y el tiempo de retorno de la inversión.

Palabras clave: Cerro Prieto, costos, perforación de pozos, punto de equilibrio.

Cost model for geothermal wells applied to the Cerro Prieto geothermal field case, BC

Abstract

A project for drilling geothermal wells to produce electrical energy can be defined as a sequence of plans to get steam or geothermal fluids to satisfy a previously known demand, and, under the best possible conditions, to obtain payment. This paper presents a cost model for nine wells drilled at the Cerro Prieto geothermal field in 2005 and 2006 to supply steam to the power plants operating in the field. The cost model is based on the well cost, the initial steam production, the annual decline of steam, the drilling schedule and the break-even point for each well. The model shows the cost of steam by the ton and the sale price needed to determine the discount rate and the investment return time.

Keywords: Cerro Prieto, costs, well drilling, break-even point.

1. Introducción

En México todos los campos geotérmicos en explotación son operados y administrados por el gobierno federal a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Los proyectos de extracción y suministro de vapor endógeno tienen como objetivo principal producir electricidad a partir del aprovechamiento de los recursos geotérmicos (vapor y/o agua caliente) y administrar los recursos necesarios para la extracción, manejo y acondicionamiento del vapor geotérmico en los complejos de generación geotermoeléctrica. Alrededor de un 80% del presupuesto anual de

gasto corriente en los campos geotérmicos en explotación se aplica en la construcción y mantenimiento de la infraestructura de extracción, conducción y manejo del vapor endógeno existente en cada campo.

Un proyecto de perforación de pozos geotérmicos puede definirse como una secuencia de planes para obtener vapor o fluidos geotérmicos destinados a satisfacer una demanda previamente determinada, que se emplearán principalmente para generar energía eléctrica, bajo las mejores condiciones para obtener un pago. Este trabajo presenta un modelo de costeo para nueve pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, que fueron perforados entre 2005 y 2006 a fin de contribuir al suministro de vapor para las plantas generadoras que operan en este campo.

La incorporación de proyectos de Obra Pública Financiada (OPF) en los esquemas de contratación ha acentuado la necesidad de que las áreas técnicas de ingeniería conozcan y dominen la formulación y evaluación de proyectos de inversión, a efecto de cumplir con la normatividad actual en materia de obra pública en México. En este ámbito, el costeo de los proyectos de perforación de pozos constituye una parte esencial en el análisis.

Un modelo de costeo de proyectos para pozos geotérmicos permite identificar las variables más importantes en un proceso de extracción y suministro de vapor endógeno, tanto técnico-operativas como económico-financieras. También ayuda a dirigir los esfuerzos del personal en una sola dirección: el cumplimiento de los objetivos que definen el quehacer de la empresa.

La adopción de un modelo de costeo como el que se presenta permitiría ampliar la participación de cada una de las áreas que conforman la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, en un sentido objetivo, identificando los elementos del proceso de suministro de vapor que tienen que ser atendidos de manera anticipada. También permitiría establecer una evaluación del desempeño de la organización referenciada a los costos del proceso, así como enriquecer el cálculo de los costos unitarios del vapor y precios de venta para determinar la tasa de descuento y el tiempo de retorno de la inversión.

2. Antecedentes

Cerro Prieto es el principal campo geotérmico de México y el segundo mayor del mundo. Está localizado en la planicie aluvial del Valle de Mexicali, a 30 km al suroeste de la ciudad de Mexicali, en la porción noroeste del estado de Baja California. El potencial geotérmico de Cerro Prieto empezó a apreciarse desde 1852, año en el cual ocurrió un terremoto en Yuma y en el Valle de Mexicali (Vaca, 2004). Las actividades de exploración empezaron en 1958 en una zona de intensa actividad térmica, cercana al volcán de Cerro Prieto. Los resultados de estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos llevaron a la construcción de tres pozos someros, a 750 m de profundidad cada uno, uno de los cuales resultó ser productor de agua y vapor de baja entalpía. En 1964 se perforaron cuatro pozos exploratorios con resultados satisfactorios y temperaturas del orden de 300° C, medidos en un buen estrato de producción de vapor. Esto permitió la perforación de 14 pozos más en 1967 para instalar las dos primeras unidades de generación, en lo que hoy se conoce como Cerro Prieto I, que empezaron a operar comercialmente en 1973 con una capacidad de 75 MW (Quijano-León y Gutiérrez-Negrín, 2003).

La capacidad actual instalada en el campo geotérmico de Cerro Prieto es de 720 MW, integrada por trece unidades de diversos tipos y capacidades nominales (Tabla 1). Con datos del año 2004, la demanda total real de vapor de esas unidades era del orden de 6 mil toneladas por hora (t/h), la cual resulta bastante superior a su demanda nominal original (RGCP, 2004).

En el año 2006 la producción anual de vapor fue de 51.4 millones de toneladas, equivalente a un promedio de 6073 t/h (Gutiérrez-Negrín, 2007). Sin embargo, la producción de los pozos declina anualmente un promedio de 17%, lo que representa una merma del orden de 1000 t/h de vapor al año, debido principalmente al deterioro en las condiciones de operación de los pozos (GPG, 2007).

Para coadyuvar al cumplimiento del programa de suministro de vapor correspondiente a los años de 2004, 2005 y 2006, se llevó a cabo un contrato de OPF para construcción de infraestructura de extracción y manejo de vapor endógeno para 30 pozos productores. Este contrato empezó en 2004 y terminó en diciembre de 2006.

ÁREA	UNIDAD NÚMERO	CAPACIDAD (MW)	MARCA	TIPO	DEMANDA NOMINAL DE VAPOR (t/h)	DEMANDA REAL DE VAPOR (t/h)	CONSUMO ESPECÍFICO (t/MWh)
CP1	1	37,5	Toshiba	Condensación	334,5	366,7	9,78
	2	37,5	Toshiba	Condensación	334,5	359,3	9,58
	3	37,5	Toshiba	Condensación	334,5	366,9	9,78
	4	37,5	Toshiba	Condensación	334,5	327,9	8,74
	5	30,0	Mitsubishi	Condensación	285,6	412,2	13,74
CP2	6	110,0	Toshiba	Condensación	774,4	826,8	7,52
	7	110,0	Toshiba	Condensación	774,4	856,3	7,78
CP3	8	110,0	Toshiba	Condensación	774,4	938,2	8,53
	9	110,0	Toshiba	Condensación	774,4	839,4	7,63
CP4	10	25,0	Mitsubishi	Condensación	168,5	173,4	6,94
	11	25,0	Mitsubishi	Condensación	168,5	181,9	7,27
	12	25,0	Mitsubishi	Condensación	168,5	181,7	7,27
	13	25,0	Mitsubishi	Condensación	168,5	177,6	7,10
		720,0	TOTAL		5 395,2	6 008,2	

Datos para el año 2004, de acuerdo con RGCP (2004).

Tabla 1. Capacidad instalada y consumo de vapor de las unidades de Cerro Prieto

En este modelo de contratación, la CFE, a través de la GPG, proporciona la ingeniería de perforación, la ingeniería básica para la infraestructura de manejo de vapor, supervisa los trabajos y paga el precio de cada pozo, de acuerdo con los precios presentados en la oferta ganadora a través de la adquisición de una deuda.

3. Recopilación de datos y consideraciones iniciales

Con la finalidad de determinar la validez del modelo de costeo, se tomó en cuenta la información correspondiente a nueve de los pozos que se perforaron mediante el contrato de OPF mencionado. Estos pozos se pagaron a precios de julio de 2006, periodo en el cual se llevó a cabo el modelo.

En la Tabla 2 se presentan las características principales de esos nueve pozos, que fueron todos de tipo vertical, incluyendo su profundidad total, la profundidad de la cima de la unidad litológica denominada Lutita Gris, la profundidad de la Zona de Sílice y Epidota, así como la profundidad del intervalo productor. La cima de la unidad de la Lutita Gris es muy importante en Cerro Prieto, ya que es en esta unidad en la que se encuentran los fluidos geotérmicos, mientras que la llamada Zona de Sílice y Epidota (ZSE) es un indicador mineralógico del yacimiento (Lira, 2005).

Después de concluidos los pozos, se obtuvieron los costos (en dólares americanos corrientes) que se presentan en la Tabla 3, preparada con los datos de los pagos realizados (Vaca Serrano, 2006).

Pozo	Profundidad total (m)	Profundidad de la cima de:		Zona productora	
		Lutita Gris (m)	ZSE (m)	Cima (m)	Fondo (m)
401	2,700	1,720	2,530	2,399	2,700
321	2,800	1,620	2,450	2,500	2,800
315	2,850	1,700	2,450	2,450	2,850
417	2,700	1,830	2,400	2,400	2,700
314	2,750	1,720	2,380	2,350	2,750
411	2,750	1,780	2,670	2,414	2,750
402	2,650	1,730	2,670	2,350	2,650
316	2,750	1,670	2,480	2,450	2,750
318	2,650	1,570	2,320	2,350	2,650

Tabla 2. Datos técnicos de nueve pozos perforados en Cerro Prieto

A partir de los datos de la Tabla 3, puede calcularse el costo unitario total por metro perforado, dividiendo el costo total de perforación, incluyendo los incrementos debido al acero, por el total de metros perforados. Se obtiene así un costo unitario

promedio de 998.2 dólares por metro. Adicionalmente, si se considera que la profundidad promedio de esos nueve pozos es de 2,733.33 metros, el costo de perforación promedio para cada pozo fue de 2 millones 728 mil 402 dólares americanos.

Pozo	Profundidad total (m)	Costo de Perforación	Costo adicional por aumento de acero	Costo total de perforación	Costo de instalaciones superficiales y vaporductos	Costo total
401	2,700	2,481,050.40	242,093.53	2,723,143.93	643,594.04	3,366,737.97
321	2,800	2,560,321.13	253,426.50	2,813,747.63	554,695.39	3,368,443.02
315	2,850	2,563,787.34	253,387.75	2,817,175.09	554,570.34	3,371,745.43
417	2,700	2,483,732.97	205,808.15	2,689,541.12	935,696.92	3,625,238.04
314	2,750	2,522,586.60	215,448.60	2,738,035.20	786,722.80	3,524,758.00
411	2,750	2,503,936.33	205,598.41	2,709,534.74	970,361.98	3,679,896.72
402	2,650	2,459,409.83	210,747.93	2,670,157.76	948,684.65	3,618,842.41
316	2,750	2,539,400.71	241,583.20	2,780,983.91	344,379.02	3,125,362.93
318	2,650	2,411,314.62	201,980.60	2,613,295.22	1,011,397.24	3,624,692.46
Totales:	24,600	22,525,539.93	2,030,074.67	24,555,614.60	6,750,102.38	31,305,716.98

Tabla 3. Costos de perforación reales (en dólares americanos) de nueve pozos perforados en Cerro Prieto.

Con el dato del costo unitario promedio puede prepararse un gráfico que correlacione la profundidad total del pozo con su costo total en dólares, el cual se presenta en la Fig. 1.

Una vez que los pozos fueron evaluados por la Residencia General de Cerro Prieto, se obtuvo el dato de su producción inicial de vapor (RGCP, comunicación personal, varias fechas). A partir de ese dato, se calculó la producción de vapor de cada pozo para una vida productiva de diez años y considerándose en cada uno una declinación anual del 17%. Se obtuvo así la producción total de vapor esperada en cada pozo, la cual se muestra en la Tabla 4.

Pozo	Producción de vapor	
	Inicial (t/h)	Acumulada en 10 años (t)
401	92	3,782,339
321	53	2,178,956
315	93	3,823,451
417	79	3,258,746
314	82	3,382,496
411	61	2,516,247
402	102	4,221,329
316	85	3,517,774
318	58	2,400,364

Tabla 4. Producción de vapor acumulada en cada pozo para una vida productiva de 10 años y una declinación anual de 17%.

4. Metodología

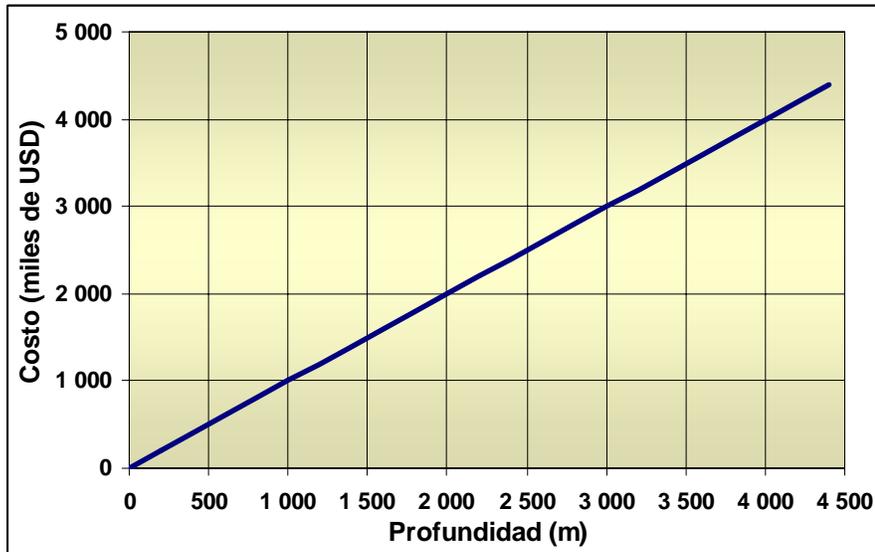


Fig. 1. Costo total de los pozos en función de su profundidad total

Con la información anterior se calculó el programa de crédito para cada pozo, asumiendo las siguientes consideraciones, de acuerdo con las condiciones actuales del mercado de deuda:

- Horizonte de 12 años.
- Tasa de interés de 5%.
- Periodo de 144 meses.

En la Tabla 5 se presenta el costo total obtenido para cada pozo, incluyendo capital e intereses, partiendo del costo total con instalaciones superficiales y vaporductos indicado en Tabla 3. Si este costo total se divide por la

cantidad de vapor que se espera obtener a lo largo de diez años, según se asienta en la Tabla 4, puede obtenerse el costo unitario total de la tonelada de vapor en cada uno de esos nueve pozos, mismo que se reporta en la cuarta columna de la Tabla 5. Puede verse que el costo unitario varía de un mínimo de 1.55 dólares para el pozo 402 a un máximo de 2.79 dólares para el pozo 321, con un costo promedio para esos nueve pozos de 1.94 dólares por tonelada de vapor.

La siguiente etapa en la metodología es obtener el punto de equilibrio, el cual se define como el nivel de producción de bienes o servicios en el cual los costos y los ingresos son iguales. Para ello se asumieron las siguientes consideraciones:

- El análisis considera tanto el costo de perforación, como el de las instalaciones superficiales y líneas de vapor de cada pozo.
- El análisis considera también el costo de capital e intereses necesarios, tomando el dato que se reporta en la Tabla 5.
- El análisis considera la producción inicial real medida en cada pozo, expresada en toneladas por hora, pero también se incluyen producciones estándares de vapor de 30, 45 y 60 t/h.

Para determinar el punto de equilibrio el modelo utiliza una gráfica con la vida productiva útil del pozo en las abscisas y los ingresos en las ordenadas. En la Fig. 2 se presenta la gráfica correspondiente para el primero de los pozos

Pozo	Total de vapor esperado (t)	Costo por pozo (capital + interés) (USD)	Costo por tonelada (USD)
401	3,782,339	6,075,349.19	1.61
321	2,178,956	6,078,425.99	2.79
315	3,823,451	6,084,385.26	1.59
417	3,258,746	6,541,817.98	2.01
314	3,382,496	6,360,499.65	1.88
411	2,516,247	6,640,450.72	2.64
402	4,221,329	6,530,276.93	1.55
316	3,517,774	5,639,782.88	1.60
318	2,400,364	6,540,833.47	2.72
Total	29,081,702	56,491,822.07	1.94

Tabla 5. Costos unitarios de la tonelada de vapor en nueve pozos de Cerro Prieto

considerados, el pozo 401. De acuerdo con ella, para una producción inicial de 92 t/h de vapor, una declinación del 17% y considerando costos de capital más intereses, el tiempo de retorno de la inversión será de tres años. Este es el punto de equilibrio, después del cual toda la producción adicional puede considerarse como ganancia, y se muestra gráficamente en la figura como el punto en el cual se interseca la línea roja, que indica el costo total del pozo (es decir, 6 millones 75 mil 349 dólares, según se ve en la Tabla 5), con la curva correspondiente a las 92 t/h de producción inicial de vapor.

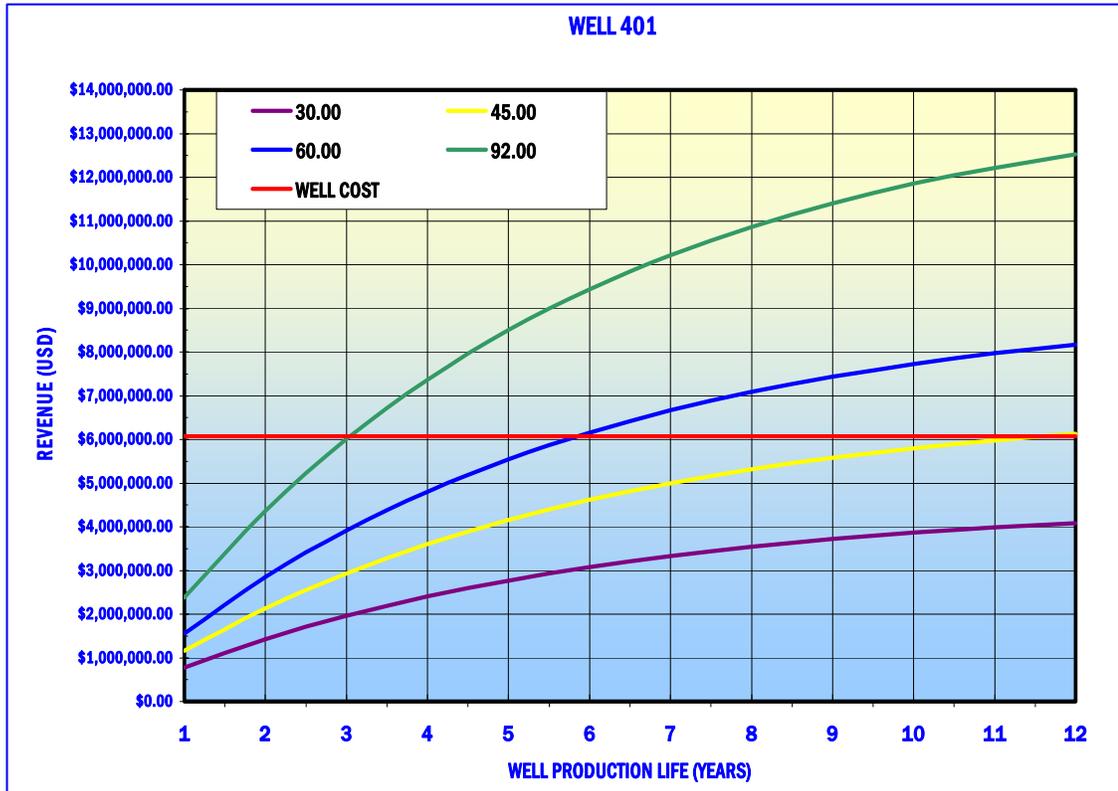


Fig. 2. Punto de equilibrio para el pozo 401.

Como también se observa en la Fig. 2, si la producción inicial del mismo pozo 401 hubiese sido de 60 t/h, el tiempo de retorno de la inversión habría sido de poco menos de 6 años. Para una producción inicial de 45 t/h, el tiempo de retorno es de 11 años, y si la producción inicial fuera de 30 t/h no habría retorno de inversión.

De manera similar se obtuvieron los puntos de equilibrio para cada uno de los nueve pozos considerados en este trabajo, tanto para su producción inicial real como para otras producciones iniciales, incluyendo las estándares mencionadas. Así, a modo de ejemplo, en la Figura 3 se presenta el caso del pozo 321, y en la Fig. 4 el caso del pozo 315. En todos los casos, el punto de equilibrio para cada producción inicial es la intersección de la línea roja con cada una de las curvas que representan a esa producción inicial de vapor, expresada en t/h.

5. Conclusiones y recomendaciones

- Puede asumirse que en todo proyecto de pozos geotérmicos las variables críticas a considerar son las siguientes:

- a) El costo del pozo.
- b) La producción de vapor.
- c) La vida productiva del pozo.
- d) El precio unitario de la tonelada de vapor.

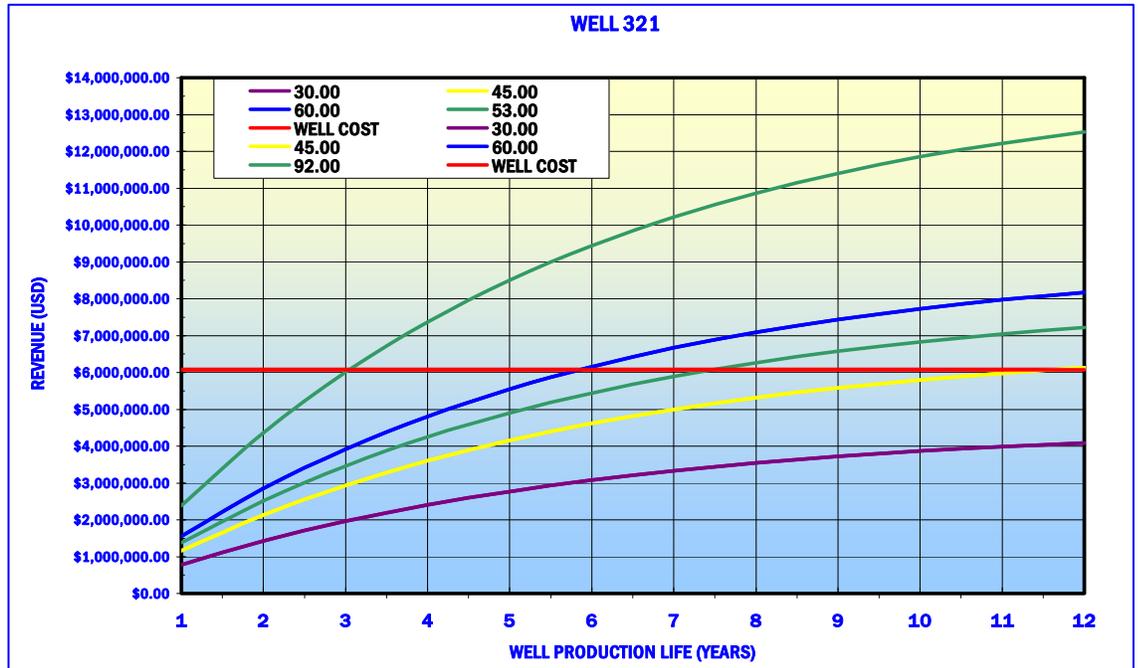


Fig. 3. Punto de equilibrio para el pozo 321

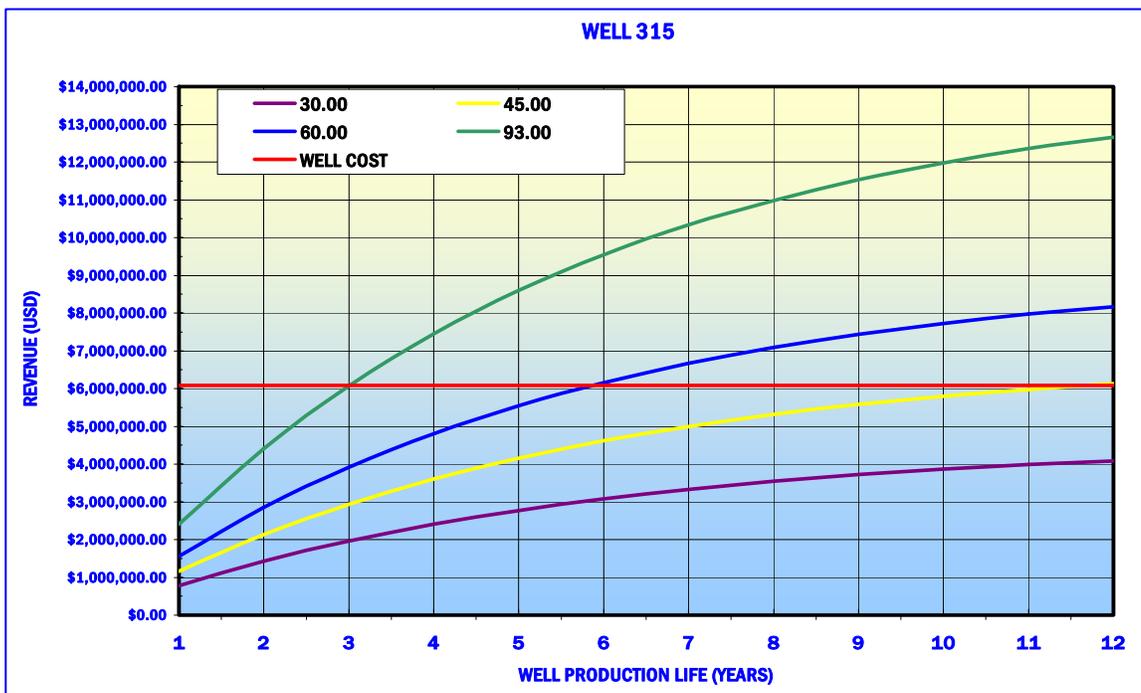


Fig. 4. Punto de equilibrio para el pozo 315

- Conociendo el costo total de la perforación, la producción inicial de vapor y la declinación anual es posible establecer un modelo de costeo y obtener el punto de equilibrio para cada pozo particular.
- Esos resultados permiten obtener el costo de la tonelada de vapor y el precio de venta para determinar el tiempo de retorno de la inversión realizada.
- Puede establecerse una estrategia apropiada durante la perforación de los pozos mediante el equilibrio entre los costos de perforación y la producción de vapor esperada.

- Cualquier decisión en el sentido de incrementar los costos de perforación, debe significar una considerable mejora en la producción de vapor, ya sea en su cantidad o en su continuidad, así como en una mejora en la vida productiva de los pozos.

- Durante la perforación es recomendable identificar los factores negativos que afectan tanto la producción de vapor esperada como la vida productiva del pozo, a fin prevenirlos y resolverlos de manera pertinente, dado que las inversiones ocurren durante la etapa de perforación y no durante la etapa productiva de los pozos.

Referencias

GPG, 2007. Situación actual, actividades y proyectos de la GPG. Informe interno de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE. Inédito.

Gutiérrez Negrín, L.C.A., 2007. 1997-2006: A decade of geothermal power generation in Mexico. Geothermal Resources Council *Transactions*, Vol. 31, pp. 167-171.

Lira Herrera, H., 2005. Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-46.

Quijano-León, J.L., and L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 2003. An Unfinished Journey. 30 Years of geothermal-electric generation in Mexico. Geothermal Resources Council *Bulletin*, Vol. 32, No. 5, September-October 2003, pp. 198-205.

RGCP, 2004. Reporte interno de la Residencia General de Cerro Prieto. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.

Vaca Serrano, Jaime M.E., 2004. Formulación y evaluación del programa de inversiones a mediano plazo para satisfacer la demanda de vapor endógeno a centrales de generación geotermoeléctrica en México. Tesis de Maestría en Administración, Universidad Vasco de Quiroga, Morelia, Mich., México. Inédito.

Vaca Serrano, Jaime M.E., 2006. Informe de Contratos de Perforación. Informe Interno de la Subgerencia de Perforación, GPG, CFE. Inédito.

Investigación sobre bombas de calor en México operando con energía geotérmica y calor de desecho

A. García-Gutiérrez, R.M. Barragán-Reyes y V. Arellano-Gómez

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, 62490 Cuernavaca, Mor., México. Correo: aggarcia@iie.org.mx

Resumen

El Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad han realizado trabajo de investigación y desarrollo (I&D) sobre bombas de calor (BC) en el pasado. Los sistemas probados incluyen compresión mecánica, absorción y transformadores térmicos. Este trabajo describe brevemente los principales aspectos de I&D sobre bombas de calor en forma general, y se da una descripción más detallada de tres de los principales estudios: (a) una BC por compresión mecánica tipo agua-agua diseñada para purificación de salmueras operando con vapor geotérmico de baja presión en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.; (b) una BC por absorción para enfriamiento y refrigeración operando con amoníaco-agua y energía geotérmica de baja entalpía, la cual fue probada en los campos geotérmicos de Los Azufres y Cerro Prieto, BC; y (c) un transformador térmico por absorción—llamado Bomba de Calor por Absorción Tipo II—, el cual fue probado para evaluar el comportamiento de diversas soluciones ternarias como fluidos de trabajo. A la fecha, se tienen planes para instalar y probar una bomba de calor geotérmica (acoplada al subsuelo) en Cerro Prieto o Mexicali, BC.

Palabras Clave: Bombas de calor, calor de desecho, energía geotérmica, investigación.

Research on heat pumps in Mexico operating with geothermal energy and waste heat

Abstract

The Instituto de Investigaciones Eléctricas and the Comisión Federal de Electricidad have done research and development (R&D) on heat pumps (HP) in past years. Tested systems include mechanical compression, absorption and heat-transformers. The main R&D aspects on HP are briefly described, and also a more detailed description about three of the main studies is presented: (a) a mechanical compression HP of the water-water type operated with low-pressure geothermal steam at the Los Azufres; Mich., geothermal field, and designed for purification of brine; (b) an absorption HP for cooling and refrigeration operating with ammonia-water and low-enthalpy geothermal energy, which was tested in the Los Azufres and Cerro Prieto, BC, geothermal fields; and (c) a heat-transformer by absorption—Absorption Heat Pump Type II—tested to assess the performance of several ternary solutions as work fluids. Plans exist to install and test a geothermal heat pump at Cerro Prieto or Mexicali, BC.

Keywords: Geothermal energy, heat pumps, research, waste heat.

1. Introducción

Una bomba de calor (BC) es una máquina térmica que opera como un refrigerador, pero a la inversa: el refrigerador está diseñado para fines de enfriamiento mientras que la BC está diseñada para propósitos de

calentamiento. Ambos sistemas producen ambos efectos simultáneamente. Sin embargo la BC extrae calor de una fuente a una temperatura T_S , como un efluente industrial o energía geotérmica de baja entalpía, y la entrega a un nivel de temperatura más útil, T_D . Para lograr este efecto la BC requiere de una cantidad pequeña de energía de alto nivel, la cual puede estar en forma de energía mecánica o térmica a alta temperatura, dependiendo del tipo de BC. Las BC son amplificadores o multiplicadores del calor utilizable, y el Coeficiente de Comportamiento o Rendimiento, COP, es una medida de la efectividad de la BC como proveedor de energía térmica en relación al uso directo de una fuente de calor de alto grado para propósitos de calentamiento.

Las BC se pueden clasificar en tres tipos: (1) compresión mecánica, (2) absorción, y (3) transformadores térmicos, llamados Bombas de Calor por Absorción Tipo 2 (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1990; Eriksson and Jernqvist, 1989; Santoyo *et al.*, 2006). La BC por compresión mecánica es el tipo mas común y típicamente entrega 3-4 kW de energía térmica equivalente por cada kW de electricidad usada, es decir, alcanza COPs de 4 a 3. Por otro lado, la BC por absorción alcanza valores de COP menores de uno, pero usa energía térmica en lugar de electricidad pues no requiere de un compresor.

A la fecha, se han desarrollado en México varios trabajos de investigación y desarrollo (I&D) sobre BC. Frías *et al.* (1991) instalaron y probaron una BC por compresión mecánica en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., cuyo objetivo fue la purificación de salmueras usando vapor geotérmico de baja presión. Best *et al.* (1986, 1990) instalaron y probaron una BC por absorción amoníaco-agua para enfriamiento y refrigeración de espacios en los campos geotérmicos de Los Azufres, Mich., y Cerro Prieto, BC. Barragán *et al.* (1998) probaron experimentalmente en un laboratorio diversas soluciones ternarias en un transformador térmico por absorción. Otra mezcla basada en Agua-Bromuro de Litio y usada en sistemas comerciales de refrigeración fue evaluada por Ayala (1995), mientras que Rivera *et al.* (1999) evaluaron experimentalmente un transformador térmico de una etapa operando con una mezcla de agua-CarrolTM como fluido de trabajo. Santoyo *et al.* (2006) describen un trabajo experimental sobre un sistema de destilación asistido por una BC para purificación de salmuera geotérmica. Este sistema también opera con efluentes industriales.

A nivel mundial, las BC geotérmicas o acopladas al subsuelo (BCG) se han convertido en el segmento de tecnología geotérmica con el más rápido crecimiento. En 2005 32 países usaron BCG para calentamiento, enfriamiento y aprovisionamiento doméstico de agua caliente. La capacidad instalada de las BCGs aumentó un 730% en los últimos 10 años y el uso de energía para calefacción creció en 500%. Los principales desarrollos se realizaron en algunos países de Europa y en EUA (Rybach, 2006).

El presente trabajo trata de una descripción en detalle de tres sistemas experimentales de BCs (Frías *et al.*, 1991; Best *et al.*, 1986, 1990; Barragán, 1998) instalados y probados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad en México. Estos sistemas son representativos de todos los tipos de BC. El trabajo a futuro incluye la instalación y prueba de una BCG en el área de Mexicali o Cerro Prieto, BC.

2. Aspectos teóricos

2.1. BC por compresión mecánica

La Fig. 1 muestra un esquema de una BC por compresión mecánica. El coeficiente real del comportamiento o rendimiento COP_A de esta BC está dado por la relación entre el calor entregado por el condensador Q_{CO} y el trabajo hecho por el compresor W :

$$COP_A = \frac{Q_{CO}}{W} \quad (1)$$

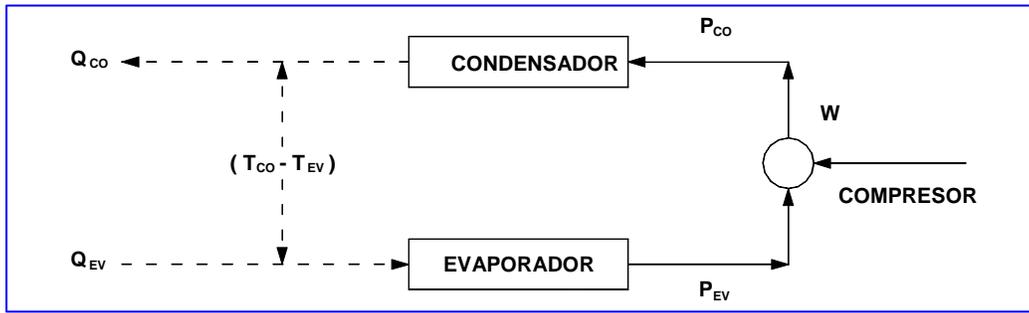


Fig. 1 Representación esquemática de una BC por compresión mecánica.

La efectividad de la BC (HPE_R) se define como el trabajo requerido en un ciclo ideal Rankine para entregar una cantidad dada de calor al condensador:

$$(HPE_R) = \frac{COP_A}{COP_R} \quad (2)$$

Para una BC bien diseñada, la HPE_R puede exceder el 80%.

2.2. BC por absorción

En una BC por absorción, el compresor de la BC por compresión mecánica es reemplazado por un circuito secundario compuesto por un absorbedor, un generador y una bomba de circulación. Las ventajas que tienen este tipo de BC sobre las BCs por compresión mecánica incluyen:

- Usan muy poca energía mecánica.
- Los fluidos de trabajo comúnmente utilizados son amigables con el ambiente.
- No tienen componentes de alta tecnología, como los compresores, y están fácilmente disponibles en diversos países.
- Pueden ser fácilmente diseñados si se dispone de los datos termodinámicos.

El coeficiente de rendimiento real de este tipo de BC en modo enfriamiento, se puede definir como:

$$COP_A = \frac{Q_{EV}}{Q_{GE}} \quad (3)$$

Además, los coeficientes teóricos de Carnot (COP_{CCL}) y Rankine (COP_{RCL}) se pueden definir como:

$$COP_{CCL} = \left[\frac{T_{GE} - T_{AB}}{T_{GE}} \right] \left[\frac{T_{EV}}{T_{CO} - T_{EV}} \right] \quad (4)$$

$$COP_{RCL} = \frac{(H_{17} - H_{15})}{H_{10} - H_{11} - (H_{11} - H_7)FR} \quad (5)$$

donde Q_{GE} es el calor manejado por el generador y FR es la relación de flujo dada por:

$$FR = \frac{X_R - X_{GE}}{X_{AB} - X_{GE}} \quad (6)$$

Esta última se define con referencia al sistema probado en el campo, el cual se muestra en la Fig. 2.

2.3. BC de tipo transformador térmico

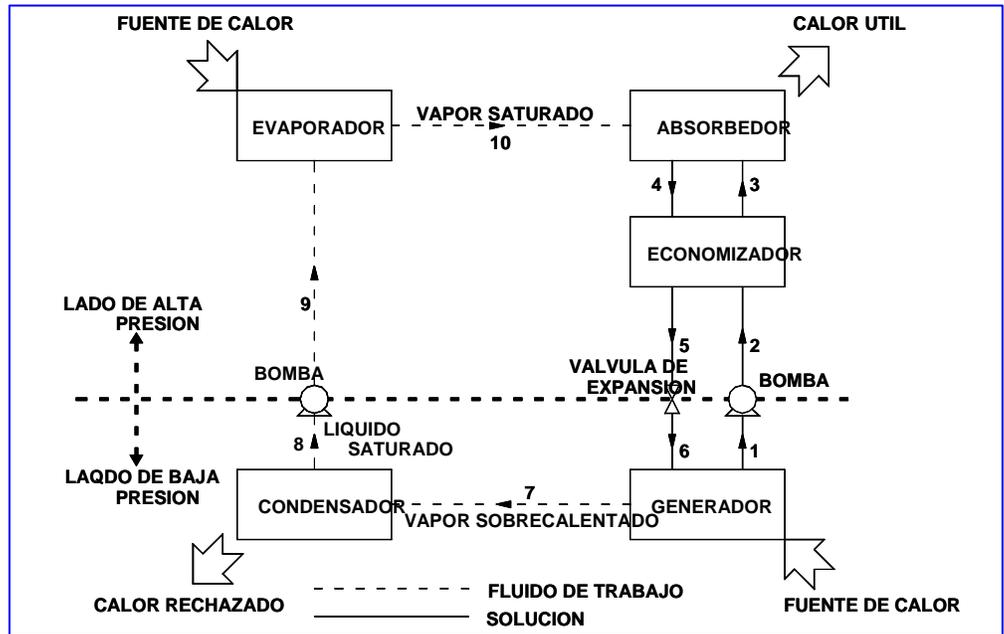


Fig. 3. Diagrama esquemático del transformador térmico por absorción (Barragán et al., 1998)

Esta es una BC marca Westinghouse Electric, modelo TPB20 con dos circuitos del fluido de trabajo y con capacidad de 56 kW_t a 71° C con un COP_A de 4.74 a partir de una fuente de calor a 52° C. La unidad opera con Freón R114 como fluido de trabajo y tiene un intercambiador de calor auxiliar para calentar agua libre de sales la cual se suministra al evaporador como fuente de calor. Otro intercambiador recibe el fluido caliente con la energía térmica proporcionada por la BC. La Fig. 4 muestra en forma esquemática el arreglo de este sistema.

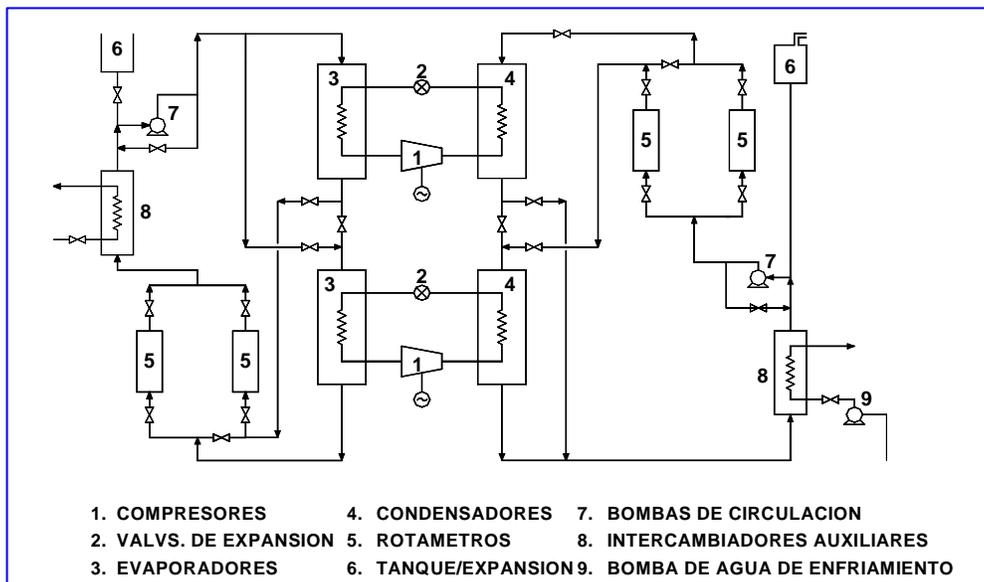


Fig. 4. Arreglo esquemático de la BC por compresión mecánica probada en el campo geotérmico Los Azufres (Frias et al., 1991)

Antes de acoplar la BC y el sistema de purificación de salmuera, se verificó la operación de la BC y se corrieron diversas pruebas al estado estable. La Fig. 5 muestra la variación de los coeficientes de rendimiento de Carnot, Rankine y real como función de la elevación total de temperatura, GTL. Se observa que los valores de COP_C son mayores que los de COP_R y que éstos son siempre mayores que los valores de COP_A, como es de esperarse. También se observa que el COP_A varía entre 4.5 y 2.2 para elevaciones de temperatura entre 26 y 52° C.

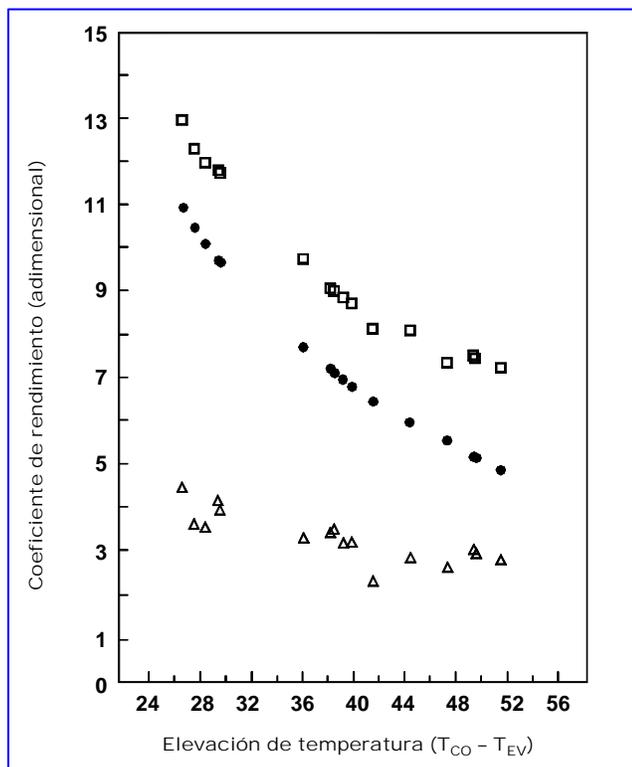


Fig. 5. Variación del coeficiente de rendimiento como función de la elevación total de temperatura de la BC por compresión mecánica (Frías et al., 1991).

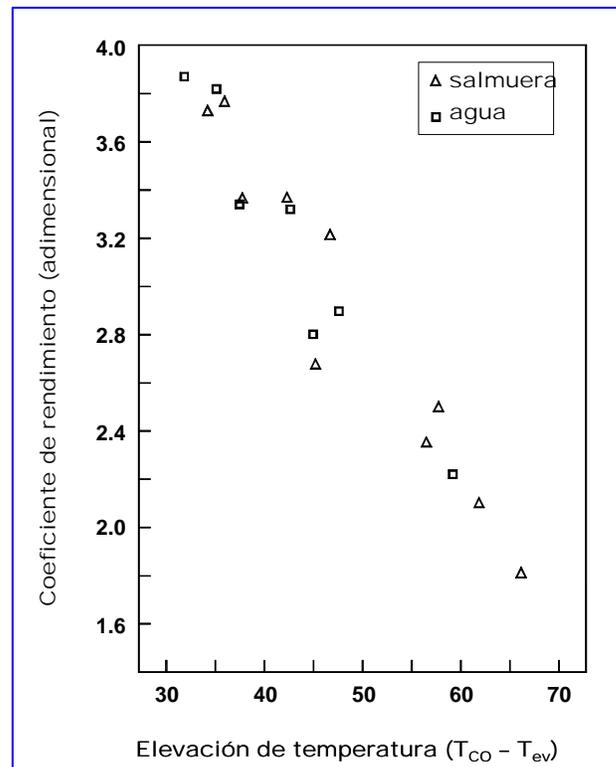


Fig. 6. Variación del coeficiente **real** de rendimiento como función de la elevación total de temperatura de la BC por compresión mecánica (Frías et al., 1991)

Para la correcta evaluación del sistema de purificación de salmuera, se utilizó un proceso de destilación por lotes y se corrieron 17 pruebas con la BC acoplada a este sistema. En siete pruebas se usó agua y en las diez restantes se usó salmuera en el evaporador del sistema de purificación, con temperaturas de ebullición entre 60 y 85° C. Las temperaturas en el condensador variaron entre 45 y 60° C, y para la determinación de las temperaturas de ebullición del agua y las velocidades de destilación en el sistema de purificación de la salmuera se aplicó un vacío al sistema de purificación.

La Fig. 6 muestra que el COP_A decrece a medida que la diferencia de temperaturas entre el condensador y el evaporador ($T_{CO} - T_{EV}$), o elevación total de temperaturas, aumenta y, por lo tanto, la velocidad de destilación de agua o salmuera aumenta a medida que disminuye el aumento total de temperaturas. Las velocidades de destilación de la salmuera alcanzaron un valor de 0.00777 kg/s con un valor del coeficiente real de rendimiento COP_A de 3.8 a una temperatura de 83° C. Los valores alcanzados de la Efectividad de la BC (HPE_R) varían entre 0.4 y 0.6 para estas pruebas.

4. BC por absorción amoníaco-agua para refrigeración probada en los campos geotérmicos de Los Azufres y Cerro Prieto

Una BC experimental de 10.5 kW_t con fines de enfriamiento y operando con amoníaco y agua fue inicialmente instalada y probada en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich. La unidad fue diseñada con un costo mínimo ya que el único componente de acero inoxidable fue el serpentín helicoidal del generador. Para el condensador y el evaporador se utilizaron unidades disponibles comercialmente cuyas capacidades

nominales fueron de 17.6 y 10.6 kW, respectivamente. El generador, rectificador y pre-enfriador son intercambiadores de calor de tipo tubos y coraza, mientras que el fluido de trabajo usado en las pruebas efectuadas en Los Azufres consistió en una mezcla de 49.3 kg de agua, 35.7 kg de amoníaco y 0.75 kg de cromato de sodio como inhibidor de corrosión. Se usó vapor geotérmico para alimentar el generador durante la operación del sistema. La Fig. 2 muestra un esquema de esta unidad, en la cual se alcanzó una capacidad de refrigeración de 10.3 kW con una temperatura del generador de 91.5° C y del evaporador de -13° C, que se considera adecuada para refrigeración y almacenamiento de alimentos perecederos, por ejemplo.

Posteriormente, esta unidad fue modificada y probada en el campo geotérmico de Cerro Prieto con el fin de operar a mayores temperaturas ambientales y del agua de enfriamiento, las cuales alcanzan hasta 40° C o más en el verano. Los cambios incluyen un nuevo separador/rectificador para operar en un rango mayor de flujos de la solución, un intercambiador de calor adicional entre el recuperador y el mezclador para alcanzar un mayor enfriamiento de la solución débil de amoníaco, y una bomba de pistón que reemplazó a la bomba original de venas rotatorias, entre otros. El sistema fue operado a temperaturas fijas del generador, y el flujo de la solución fue variado para cada una de las temperaturas del generador.

La Fig. 7 es una gráfica de los coeficientes de rendimiento de Carnot, Rankine y real, ecuaciones 3-5, contra la temperatura del generador para un valor fijo del flujo de solución de $6.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}$. Se puede observar que el coeficiente de rendimiento real es menor que los coeficientes de Carnot y Rankine, pero está dentro de un 60% del coeficiente de Rankine, COP_{ECL} , (ecuación 5). También se ve que todos los valores de COP aumentan al disminuir la temperatura del generador. Las pruebas realizadas con este sistema en los dos campos geotérmicos nacionales muestran que puede ser operada exitosamente bajo condiciones ambientales extremas y con altas temperaturas del agua de enfriamiento, usando fluidos geotérmicos de baja entalpía u otras fuentes de calor similares.

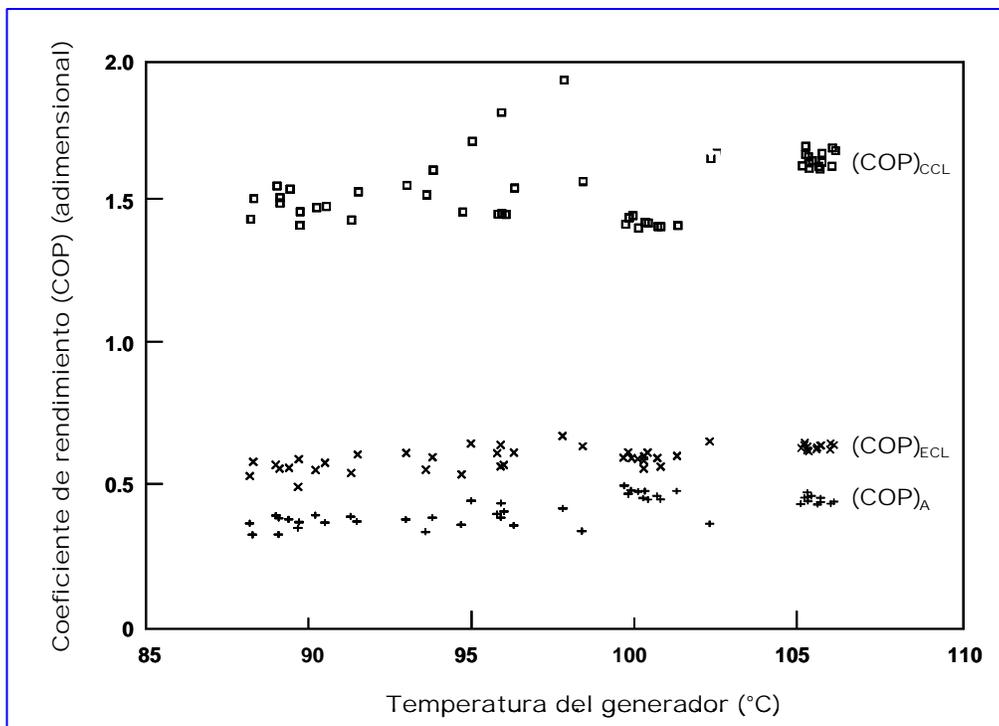


Fig. 7 Variación del coeficiente real de rendimiento como función de la temperatura del generador de la BC por absorción amoníaco/agua (Best et al., 1986; 1990)

5. Transformador térmico por absorción para pruebas de comportamiento de soluciones ternarias como fluidos de trabajo

Se diseñó y construyó un transformador térmico por absorción para efectuar pruebas de fluidos de trabajo compatibles con el medio ambiente. Resultados experimentales obtenidos previamente con este equipo para los sistemas $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$, $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2$ y $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$ fueron documentados por Barragán *et al.* (1995, 1996a, 1996b).

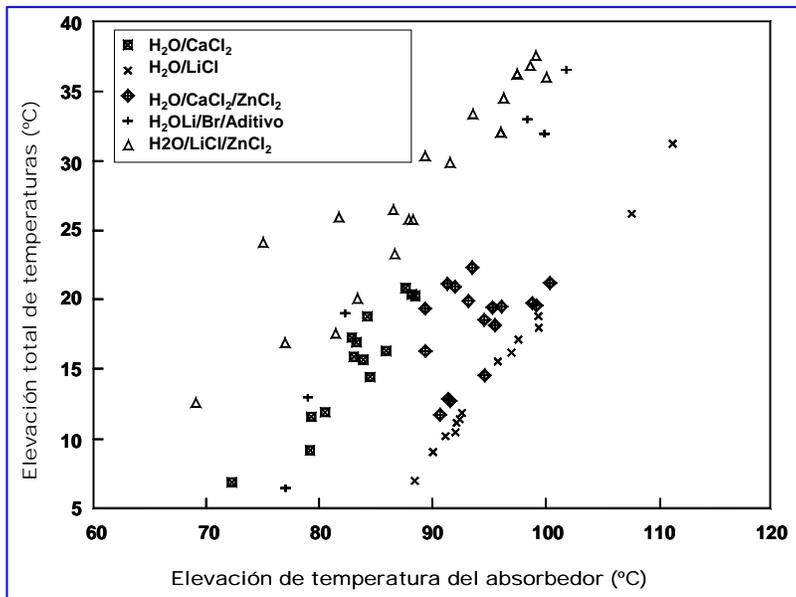


Fig. 8. Elevación total de temperatura como función de la temperatura del absorbedor en el transformador térmico (Barragán *et al.*, 1998)

rendimiento con respecto a las otras soluciones. La elevación de temperatura obtenida fue de 37.5°C para esta solución, hecho que se considera relevante ya que compara muy bien contra los resultados obtenidos para la solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ obtenidos en la Universidad de Salford, U.K. (Siddig *et al.*, 1983). Para el caso de la solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$, los valores de la elevación total de temperaturas se comparan bien contra los obtenidos para la solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$ para temperaturas del absorbedor de hasta 105°C .

La Fig. 9 muestra la elevación total de temperatura de los fluidos de trabajo contra la concentración en el absorbedor. En todos los casos la elevación de temperatura dependió de la concentración de la solución absorbente. La elevación de temperaturas más alta fue obtenida para la solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}/\text{ZnCl}_2$ para una concentración de 60%, y a pesar de que se obtuvieron concentraciones mayores (del orden de 65% para la solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$), la elevación de temperaturas fue de menos de 20°C .

Esas dos tendencias del comportamiento de la elevación de temperaturas de la solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$ mostraron dependencia de la temperatura del evaporador. En la tendencia superior se obtuvieron menores temperaturas del

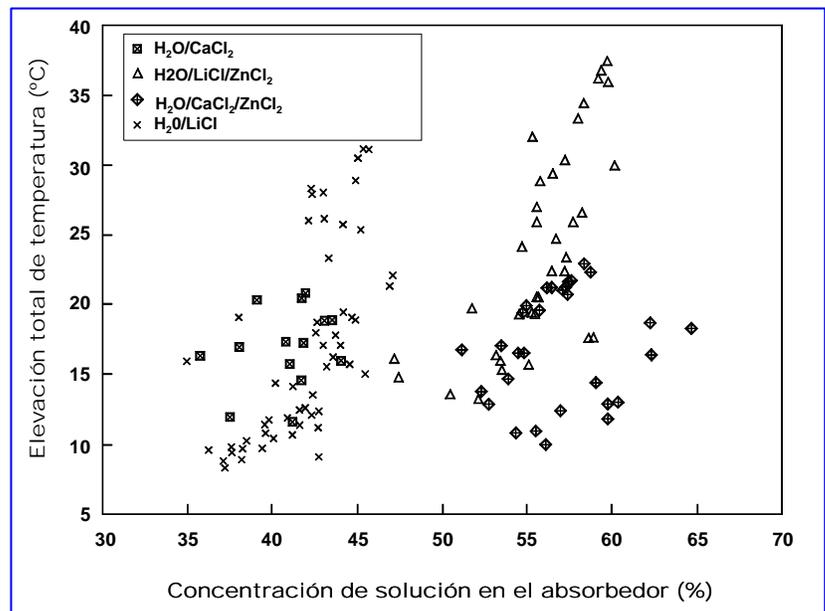


Fig. 9. Elevación total de temperatura como función de la concentración de solución en el absorbedor del transformador térmico (Barragán *et al.*, 1998)

Posteriormente, se consideró que la alta solubilidad del Cloruro de Zinc, ZnCl_2 , era deseable para mejorar la solubilidad de LiCl y CaCl_2 en las soluciones, y se agregó a las mezclas binarias experimentales de $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$, $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2$ para obtener mayores concentraciones de las soluciones y evitar el problema de cristalización. Finalmente, se realizaron una serie de experimentos cuyos resultados se resumen como sigue (Barragán *et al.*, 1998).

La elevación total de temperatura dependía de la temperatura para el caso de las soluciones binarias y ternarias, como se ve en la Fig. 8, en la cual también se incluyen para comparación los resultados de Ayala (1995) obtenidos para $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}/\text{Aditivo}$. Se puede observar que la solución ternaria de $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}/\text{ZnCl}_2$ muestra el mejor

evaporador que en la parte localizada debajo de ésta. Las elevaciones de temperatura obtenidas para la solución ternaria de $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$ fueron ligeramente superiores que para la solución binaria de $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2$, lo cual demuestra que hay una ligera ganancia en rendimiento al usar la solución ternaria. La Tabla 1 muestra las elevaciones máximas de temperatura obtenidas para cada una de las soluciones probadas.

Fluido de trabajo:	$\text{H}_2\text{O} / \text{LiCl}$	$\text{H}_2\text{O} / \text{LiCl} / \text{ZnCl}_2$ (1:1 en peso)	$\text{H}_2\text{O} / \text{CaCl}_2$	$\text{H}_2\text{O} / \text{CaCl}_2 / \text{ZnCl}_2$ (2.5:1 en peso)	$\text{H}_2\text{O} / \text{MgCl}_2$	$\text{H}_2\text{O} / \text{MgCl}_2 / \text{ZnCl}_2$ (2:1 en peso)
Elevación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$):	32.5	37.5	20	22.9	18.5	19.6
T_{AB} ($^{\circ}\text{C}$):	111	96	85	85	101	98

Tabla 1. Elevaciones máximas de temperatura para diferentes fluidos de trabajo (Barragán et al., 1998)

El coeficiente real de rendimiento COP_A tiende a disminuir al aumentar la relación de flujo de recirculación, FR (Fig. 10). Considerando ambas soluciones ternarias, los valores del coeficiente de rendimiento de la solución $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$, decrecieron en forma más drástica al variar la relación de flujo FR que para el caso de la solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}/\text{ZnCl}_2$. Durante los experimentos se observó una viscosidad relativamente alta para la solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2/\text{ZnCl}_2$, de manera que la viscosidad puede ser la causa de los menores coeficientes de rendimiento obtenidos. Por otro lado, si se minimizan las pérdidas de calor, el comportamiento del coeficiente de rendimiento con respecto a la relación de flujo resulta en un mejor rendimiento de la solución $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}/\text{ZnCl}_2$.

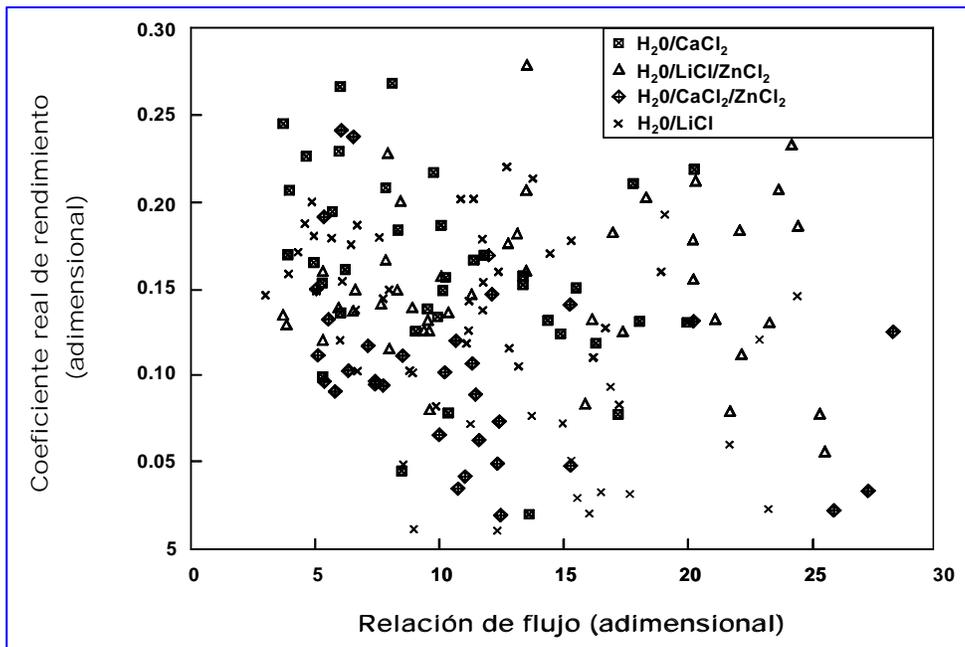


Fig. 10. Coeficiente real de comportamiento como función de la relación de flujo en el transformador térmico (Barragán et al., 1998)

6. Conclusiones

A la fecha se ha desarrollado una cantidad sustancial de investigación y desarrollo sobre BC en México con relación al uso integral de la energía geotérmica, de tal suerte que se han instalado y probado BC por compresión mecánica, por absorción y transformadores térmicos tanto en los campos geotérmicos del país como en el laboratorio. Se han obtenido resultados sobre: (a) purificación de agua y salmueras geotérmicas para obtener agua destilada, (b) calentamiento, enfriamiento y refrigeración de espacios y otros fluidos, y (c) el desarrollo de

fluidos de trabajo avanzados que sean económicos, seguros y amigables con el ambiente en su uso. A la fecha, se tienen planes de instalar y probar una BC geotérmica, acoplada al subsuelo, en las áreas de Mexicali o Cerro Prieto, en Baja California.

Referencias

- Ayala, R., 1995. An experimental study of heat driven absorption cooling systems. Ph.D. thesis, University of Salford, U.K. Inédito
- Barragán, R.M., C.L. Heard, V.M. Arellano, R. Best, and F.A. Holland, 1995. Experimental performance of the water-lithium chloride system in a heat transformer. *Int. J. of Energy Research*, **19**, pp. 593-602.
- Barragán, R.M., C.L. Heard, V.M. Arellano, R. Best, and F.A. Holland, 1996(a). Experimental performance of the water/calcium chloride system in a heat transformer. *Int. Journal of Energy Research*, **20**, pp. 651-661.
- Barragán, R.M., C.L. Heard, V.M. Arellano, R. Best, and F.A. Holland, 1996(b). Experimental performance of the water/magnesium chloride system in a heat transformer, *Int. Journal of Energy Research*, **21**, pp. 139-151.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, C.L. Heard, and R. Best, 1998. Experimental performance of ternary solutions in an absorption heat transformer. *Int. Journal of Energy Research*, **22**, pp. 73-83.
- Best, R., C.L. Heard, H. Fernández, and J. Siqueiros, 1986. Developments in geothermal energy in México-Part 5: The commissioning of an ammonia/water absorption cooler operating on low enthalpy geothermal energy. *Heat Recovery Systems and CHP*, **6**(3), pp. 209-216.
- Best, R., C.L. Heard, P. Peña, H. Fernández, and F.A. Holland, 1990. Developments in geothermal energy in México-Part 26: Experimental assessment of an ammonia/water absorption cooler operating on low enthalpy geothermal energy. *Heat Recovery Systems and CHP*, **10** (1), pp. 61-70.
- Eriksson, K. A. and Jernqvist, 1989. Heat transformer with self-circulation: design and preliminary operational data. *Rev. Int. Froid*, **12**, pp. 15-19.
- Frías, J.L., J. Siqueiros, H. Fernández, A. García, and F.A. Holland, 1991. Developments in geothermal energy in México-Part 36: The commissioning of a heat pump assisted brine purification system. *Heat Recovery Systems and CHP*, **11**(4), pp. 297-310.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1990. Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor. Cuernavaca, Morelos, México. Inédito.
- Rivera, W., R.J. Romero, R. Best, and C.L. Heard, 1999. Experimental evaluation of a single-stage heat transformer operating with the water/CarrollTM mixture. *Energy*, **4**(4), pp. 317-326.
- Rybach, L., 2006. Geothermal heating and cooling – the worldwide advance of geothermal heat pumps. *Renewable Energy 2006 Proceedings*, 9-13 October, Chiba, Japan, pp. 1512,-1515.
- Santoyo, S., R.M. Barragán-Reyes, and F.A. Holland, 2006. Bomba de calor para purificación de salmuera geotérmica. *Geotermia*, Vol. 20, No. 1, pp. 41-51.

Siddig, B.E., F.A. Watson, and F.A. Holland, 1983. Study of the operating characteristics of a reversed absorption heat pump system (heat transformer). *Chem. Eng. Res. Des.* **61**, pp. 283-289.

Foro

Sección con artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos de los artículos técnicos usuales y que no han sido sometidos a arbitraje técnico.

Una Tierra sin gente

Bob Holmes

(Artículo aparecido en el número 2573 del semanario *New Scientist*, 12 de octubre de 2006, p. 36-41.

Traducción de Luis C.A. Gutiérrez Negrín.)

Los seres humanos son sin duda la especie más dominante que la Tierra ha conocido jamás. En unos cuantos miles de años hemos devorado más de un tercio del terreno del planeta para nuestras ciudades, granjas y pastizales. Según ciertas estimaciones, hemos expropiado el 40 por ciento de toda su productividad. Y estamos dejando un basural detrás: praderas sobreexplotadas, bosques devastados, acuíferos agotados, desechos nucleares, polución química, especies invasoras, extinciones en masa y ahora el creciente espectro del cambio climático. Si pudieran, las otras especies con las que compartimos la Tierra seguramente votarían por echarnos del planeta.

Supongamos que se pueda cumplir su deseo. Imaginemos que toda la gente sobre la Tierra —los 6 mil quinientos millones que somos, más lo que se está acumulando— pudiera desaparecer mañana y ser transportada a un campo de readaptación en una galaxia lejana. (No invoquemos a la madre de todas las plagas para acabar con nosotros, cuando menos para evitar las complicaciones derivadas de tantos cadáveres.) Dejada a su propio curso, la Naturaleza empezaría a recuperar el planeta, convirtiendo los campos y pastizales en praderas y bosques, limpiando de contaminantes el agua y el aire y pulverizando las ciudades y carreteras.

“La triste verdad, cuando los seres humanos salen de escena, es que el panorama empieza a ser mucho mejor”, dice John Orrock, biólogo conservacionista del Centro Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica en Santa Bárbara, California. Sin embargo, ¿desaparecerían por completo nuestras huellas, o ya habremos alterado tanto el planeta que incluso dentro de un millón de años un visitante podría darse cuenta de que alguna vez una sociedad industrial dominó la Tierra?

Si amaneciera mañana sin personas, el cambio sería evidente de manera inmediata incluso desde la órbita terrestre, ya que la llamarada de luz artificial que brilla en la noche empezaría a palidecer. En efecto, casi no hay mejor manera de entender qué tan completamente dominamos la superficie terrestre que mirar la iluminación artificial. Según algunas estimaciones, 85 por ciento del cielo nocturno sobre la Unión Europea está contaminado por la luz; en Estados Unidos este porcentaje es de 62 y en Japón del 98,5. En algunos países, incluyendo Alemania, Austria, Bélgica y Holanda, no hay cielo nocturno libre de polución luminosa.

“Muy pronto —en 24, tal vez 48 horas— se empezarían a ver huecos oscuros debido a la falta de combustible en las plantas eléctricas”, dice Gordon Masterton, presidente de la Institución de Ingenieros Civiles de Inglaterra, en Londres. Las fuentes renovables, como los aerogeneradores y las plantas solares, mantendrían encendidas unas cuantas luminarias automáticas, pero la falta de mantenimiento de la red de distribución terminaría por apagarlas en cosa de semanas o meses. La pérdida de electricidad también silenciaría rápidamente las bombas de agua, las plantas de tratamiento y la demás maquinaria de la sociedad moderna.

La misma falta de mantenimiento provocaría el pronto decaimiento de edificios, carreteras, puentes y otras estructuras. Aunque los edificios modernos se diseñan típicamente para durar 60 años, los puentes 120 años y las presas 250, tal duración asume que alguien los estará limpiando, reparando sus pequeñas fugas y resolviendo problemas en sus cimientos. Sin gente para hacer esos trabajos aparentemente irrelevantes, las cosas se colapsan muy pronto.

La mejor prueba de ello es la ciudad de Pripyat, cerca de Chernobil en Ucrania, que fue abandonada después del desastre nuclear de hace 20 años y permanece desierta. “De lejos, uno creería que Pripyat es aún una ciudad viva, pero los edificios están decayendo lentamente”, dice Ronald Chesser, biólogo ambientalista de la Universidad Técnica de Texas en Lubbock, quien ha trabajado mucho en la zona de exclusión alrededor de Chernobil. “Lo que más se ve invadiendo son plantas cuyas raíces se introducen en el concreto, entre los



ladrillos, en los marcos de las puertas y en todas partes, y están deshaciendo velozmente las estructuras. Uno no puede imaginarse, cuando paseamos cerca de casa, que jugamos un enorme papel en evitar que eso ocurra; pero evidentemente lo hacemos. Es realmente fascinante ver cómo las plantas invaden cada grieta y cada rincón de una ciudad.”

Sin nadie para hacer reparaciones, cada tormenta, inundación o helada carcomerán los edificios abandonados, y en unas cuantas décadas los techos empezarán a caerse y los edificios a colapsarse. Esto ya empezó a ocurrir en Pripyat. Las casas de madera y otras estructuras más pequeñas, construidas bajo estándares poco rigurosos, serán las primeras en desaparecer. Los siguientes serán las estilizadas estructuras de vidrio tan aclamadas en nuestros días. “Los elegantes puentes suspendidos y las formas ligeras son el tipo de estructuras que serían más vulnerables”, indica

Masterton. “Tienen menos resistencia integrada en su diseño, a diferencia de los edificios de mampostería sólida y aquellos con arcos y cúpulas.”

Pero aunque los edificios se desplomarán, sus ruinas —especialmente las hechas de piedra o concreto— es probable que duren miles de años. “Aún tenemos registro de civilizaciones de 3 mil años de antigüedad”, observa Masterton. “Habrá signos de las civilizaciones que creamos por muchos miles de años. Va a pasar mucho tiempo antes de que una carretera de concreto desaparezca. Podrá estar severamente deshecha en muchas partes, pero tomará mucho tiempo para que se vuelva invisible.”

La falta de mantenimiento tendrá consecuencias especialmente dramáticas en las más o menos 430 centrales nucleares que operan actualmente en todo el mundo. Los residuos nucleares ya almacenados en depósitos de concreto y metal enfriados por aire no tendrán problema, ya que los contenedores están diseñados para sobrevivir miles de años sin mantenimiento, tiempo durante el cual su radiactividad —principalmente en forma de cesio-137 y estroncio-90— habrá descendido a un milésimo, comenta Rodney Ewing, geólogo de la Universidad de Michigan especializado en manejo de residuos radiactivos. A los reactores en operación no les irá tan bien. Conforme el agua de enfriamiento se evapore o se infiltre, es probable que los núcleos de los reactores se incendien o se fundan, emitiendo grandes cantidades de radiación. Los efectos de esas emisiones, sin embargo, pueden ser menos terribles de lo que la mayoría supone.

El área periférica de Chernobil ha mostrado qué tan rápido la naturaleza puede recuperar su equilibrio. “Yo realmente esperaba ver un desierto nuclear ahí,” comenta Chesser. “Me quedé bastante sorprendido. Cuando uno entra a la zona de exclusión encuentra un ecosistema muy floreciente.”

Los primeros años después de que se evacuó la zona, aumentaron las ratas y ratones y deambulaban por el área feroces jaurías, pese a los esfuerzos por exterminarlos. Pero el apogeo de estas alimañas fue corto, y ya la fauna nativa ha empezado a controlarlas. El jabalí salvaje es de 10 a 15 veces más abundante dentro de la zona de exclusión de Chernobil que fuera de ella, y los grandes depredadores están logrando un retorno espectacular. “Nunca he visto a un lobo en Ucrania fuera de la zona de exclusión. Y he visto a muchos dentro de ella,” dice Chesser.

Lo mismo ocurriría en la mayoría de los demás ecosistemas si la gente desapareciera, aunque las tasas de recuperación pueden variar. Las regiones más húmedas y calientes, donde los procesos de los ecosistemas tienden a ser más rápidos, volverán al equilibrio con más rapidez que las regiones más frías y áridas. Previsiblemente, las áreas que aún son ricas en especies nativas se recuperarán más velozmente que los sistemas alterados de manera más severa. En los bosques boreales del norte de Alberta, Canadá, por ejemplo, los impactos humanos consisten básicamente en caminos de acceso, tuberías y otras estrechas líneas a través del bosque. Sin actividad humana, el bosque las cerrará en más de un 80 por ciento en 50 años y en un 95 por ciento en 200 años, de acuerdo con simulaciones realizadas por Brad Stelfox, ecologista independiente especialista en uso del suelo que reside en Bragg Creek, Alberta.

En contraste, a sitios donde los bosques nativos han sido reemplazados por plantaciones de una sola especie de árboles, les puede llevar varias generaciones arbóreas –varios siglos— volver a su estado natural. Los vastos sembradíos de arroz, trigo y maíz que cubren los cinturones de granos del mundo también pueden requerir de mucho tiempo para volver a especies principalmente nativas.

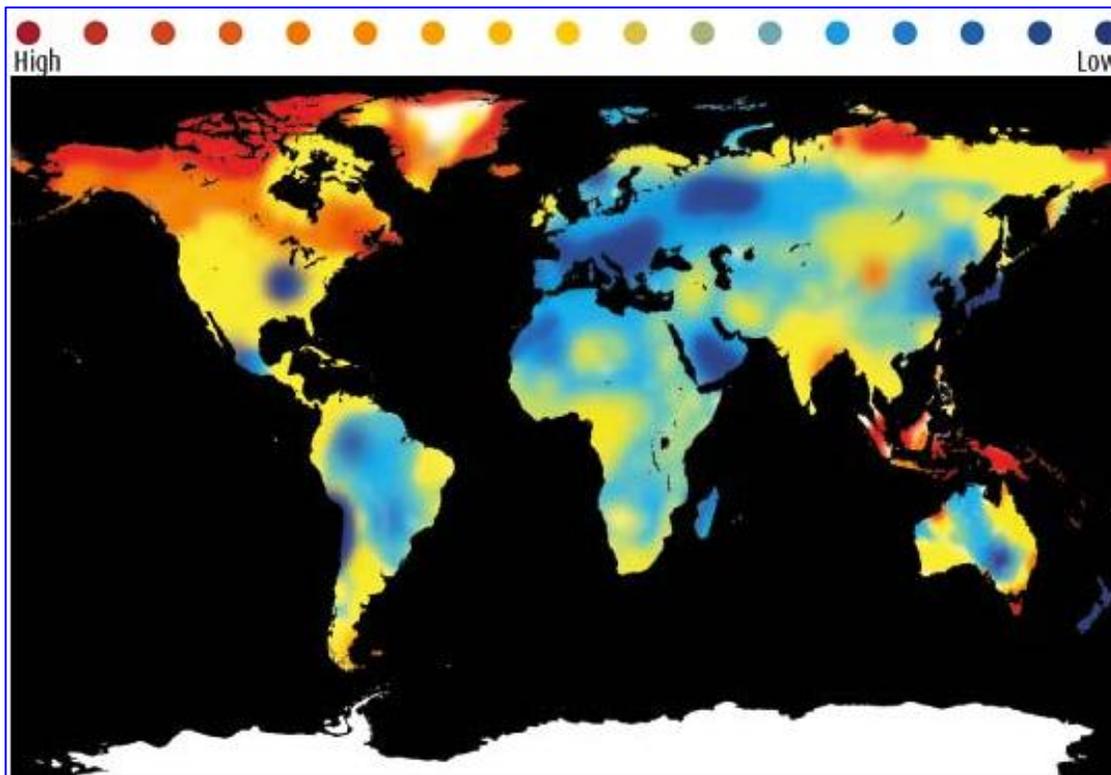
En el extremo, algunos ecosistemas pueden no regresar nunca al estado en que estaban antes de que los humanos interfirieran, porque se han trabado en un nuevo “estado natural” que se resiste a volver al original. En Hawai, por ejemplo, pastos exógenos generan ahora incendios forestales que evitarían que los bosques nativos se restablecieran aun si se les soltaran las riendas, opina David Wilcove, biólogo conservacionista en la Universidad de Princeton.

Descendientes salvajes de animales y plantas domésticos también son candidatos a volverse adiciones permanentes en muchos ecosistemas, así como los caballos y puercos salvajes ya lo son en algunos sitios. Especies altamente domesticadas, como el ganado, los perros y el trigo, que son productos de siglos de selección y cultivo artificial, probablemente regresarán a formas más duraderas y menos especializadas mediante reproducción aleatoria. “Si el hombre desapareciera mañana, ¿usted esperaría ver manadas de perros ovejeros vagando por las praderas?”, pregunta Chesser. Casi con certeza no –pero probablemente lo harán híbridos más resistentes. Incluso el ganado vacuno y de otro tipo, criado por su carne o su leche más que por su robustez, es probable que persista, aunque en cantidades mucho menores que las actuales.

¿Qué pasará con los cultivos modificados genéticamente? En agosto (de 2006), Jay Rechman y colegas de los laboratorios de la agencia norteamericana de protección al ambiente en Corvallis, Oregon, reportaron que una versión genéticamente modificada de un pasto perenne (*creeping bentgrass*) se había adaptado en el campo después de escapar de un solar experimental en Oregon. Como la mayoría de los cultivos modificados genéticamente, este pasto rastrero había sido modificado para ser resistente a los pesticidas, lo cual le acarrea un costo metabólico al organismo, de tal modo que sin riego estará en desventaja y probablemente morirá.

Tampoco nuestra ausencia representará un alivio para todas las especies que se encuentran cerca de la extinción. Los biólogos estiman que la pérdida de hábitat es fundamental en cerca del 85 por ciento de los casos de especies norteamericanas en peligro, y por tanto muchas de esas especies se beneficiarán cuando los hábitat empiecen a recuperarse. Sin embargo, las especies en más serios aprietos pueden haber pasado ya cierto umbral más allá del cual carecen de la diversidad genética o de la masa ecológica crítica necesaria para

recuperarse. Estas “especies muertas en vida” –los chitas y los cóndores de California, por ejemplo— es probable que desaparezcan pase lo que pase.



Áreas con riesgo de extinción de especies de mamíferos en el mundo.

Otras causas del riesgo de extinción pueden ser más difíciles de revertir que la pérdida de hábitat. Por ejemplo, cerca de la mitad de todas las especies en peligro tienen problema debido, al menos en parte, a la depredación o a la competencia de especies invasoras exógenas. Algunas de estas especies –como los gorriones domésticos, por ejemplo, que son nativos de Eurasia pero ahora predominan en muchas ciudades de Norteamérica— disminuirán cuando los jardines y las fuentes de alimento de la civilización suburbana desaparezcan. Pero otras, como los conejos en Australia y el césped en rollo en el occidente norteamericano, no requieren ayuda humana y probablemente permanecerán un buen rato y continuarán cercando a las especies nativas en riesgo.

Irónicamente, unas cuantas especies en riesgo –las suficientemente carismáticas para haber conseguido respaldo serio de los conservacionistas— estarán realmente peor sin gente que las proteja. El cerrojillo de Kirtland –una de las aves más raras en Norteamérica, cuyo número alguna vez se redujo a unos cuantos centenares— sufre no sólo por la pérdida de hábitat cerca de sus sitios de residencia en los Grandes Lagos sino también por *cowbirds* de cabeza marrón que dejan sus huevos en los nidos de los cerrojillos y los engañan para que críen a sus polluelos en lugar de los propios. Gracias a un agresivo programa de captura de *cowbirds*, el número de cerrojillos ha empezado a aumentar, pero si la gente desapareciera estos de nuevo tendrían problemas, dice Wilcove.

Pero, con todo, una tierra sin personas probablemente sería un lugar más seguro para la biodiversidad amenazada. “Yo esperarí que el número de especies que se beneficiarían fuera significativamente mayor que el de especies que salieran perjudicadas, al menos globalmente,” indica Wilcove.

La recuperación

También en los océanos la población de peces se recuperará gradualmente de la intensa sobre-pesca. La última vez que la pesca más o menos se detuvo –durante la Segunda Guerra Mundial, cuando muy pocos barcos pesqueros se aventuraban mar adentro— los bacalaos del Mar del Norte aumentaron enormemente. No obstante, hoy la cantidad de bacalaos y otros peces de importancia económica ha bajado a niveles inferiores a los de los años treinta, y su recuperación tomaría bastante más de alrededor de un lustro.

El problema es que ahora hay tan pocos bacalaos y otros grandes peces depredadores, que no pueden mantener a raya a cardúmenes de peces más pequeños como las trillas. Al contrario, los peces más pequeños le dan vuelta a la tortilla y compiten o se comen a bacalaos jóvenes más débiles, manteniendo así controlados a sus otrora depredadores. El problema sólo empeorará en los primeros años después de dejar de pescar, ya que los peces más pequeños y de crecimiento más rápido florecerán como la maleza en un jardín abandonado. Eventualmente, sin embargo, depredadores suficientemente grandes llegarán a su madurez al cesar la pesca, hasta restaurar el equilibrio natural. Esta transición podría tomar un tiempo indefinido entre unos años y décadas, según Daniel Pauly, biólogo pesquero en la Universidad de Columbia Británica en Vancouver.

Sin redes de pesca que revuelvan nutrientes del piso oceánico, los ecosistemas costeros regresarán a un estado relativamente pobre en nutrientes. Esto se reflejará en un decremento en la frecuencia de oleadas de algas dañinas, tales como las mareas rojas que continuamente plagan hoy día las áreas costeras. Mientras tanto, los altos y gráciles corales y otros organismos que residen en el fondo de los arrecifes de aguas profundas empezarán a crecer gradualmente de nuevo, restaurando las complejas estructuras tridimensionales de los hábitat del suelo oceánico que hoy son esencialmente basurales planos e inconspicuos.

Pero mucho antes de que ocurra cualquiera de esas cosas –de hecho, desde el instante en que los seres humanos se desvanezcan de la Tierra--, cesará la polución atmosférica proveniente de los escapes de automóviles y de las chimeneas de nuestras fábricas. Lo que ocurra después dependerá de la química de cada contaminante particular. Algunos, como los óxidos de nitrógeno y de azufre y el ozono (el contaminante atmosférico, no la capa protectora de la estratosfera), se lavarán de la atmósfera en cuestión de semanas. A otros, como los clorofluorocarbonos, las dioxinas y el pesticida DDT, les tomará más tiempo disolverse. Algunos durarán unas cuantas décadas.

Los excedentes de nitratos y fosfatos que pueden convertir lagos y ríos en espesas sopas de algas, también se irán disolviendo en unas décadas, al menos en los cuerpos de agua superficial. Cierta exceso de nitrato puede permanecer mucho más tiempo en el agua subterránea, donde está menos propenso a ser transformado en nitrógeno atmosférico por los microbios. “El agua subterránea es la memoria de largo plazo del sistema”, observa Kenneth Potter, hidrólogo en la Universidad de Wisconsin en Madison.

El bióxido de carbono, la mayor preocupación del mundo actual por su rol central en el calentamiento global, sufrirá un destino más complejo. La mayor parte del CO₂ emitido por la quema de combustibles fósiles es absorbido eventualmente en el océano. Esto ocurre de manera relativamente rápida en las aguas superficiales –en unos cuantos decenios— pero a las profundidades oceánicas les lleva cerca de un milenio absorber por completo su parte. Aun cuando se alcanza el equilibrio, cerca del 15 por ciento del CO₂ derivado de la quema de combustibles fósiles permanece en la atmósfera, llevando su concentración a unas 300 partes por millón (ppm), mientras que sus niveles preindustriales eran de 280 ppm. “Habrá CO₂ en la atmósfera y continuará influyendo en el clima más de mil años después de que los seres humanos dejen de emitirlo”, considera Susan Solomon, química atmosférica de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) en Boulder, Colorado. Eventualmente los iones de calcio liberados de los sedimentos de los fondos oceánicos posibilitarán que el mar absorba el excedente remanente en los siguientes 20 mil años, más o menos.

Pero incluso si las emisiones de CO₂ cesaran mañana, el calentamiento global continuará otro siglo disparando las temperaturas promedio en unas decenas de grado. Los científicos atmosféricos le llaman a esto el “calentamiento comprometido”, y ocurre porque los océanos tardan mucho más tiempo en calentarse que la atmósfera. En esencia, los océanos están funcionando como un acondicionador de aire gigantesco, manteniendo a la atmósfera un poco más fría de lo que debería ser dado el nivel actual de CO₂. La mayoría de los estadistas y políticos no toman en cuenta este calentamiento latente, observa Gerald Meehl, especialista en modelos climáticos en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica, también en Boulder. “Ellos creen que si las cosas fueran demasiado mal sólo necesitaríamos meter el freno y listo, pero no podemos solamente parar y esperar que todo vaya a estar bien, porque ya hemos comprometido este calentamiento.”

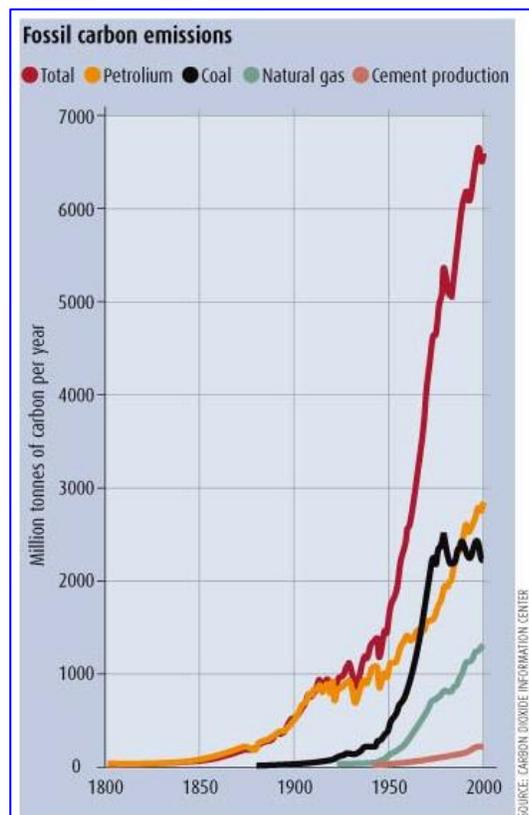
Ese calentamiento extra, que es ya inevitable, acarrea cierta incertidumbre sobre el destino de otro importante gas de invernadero, el metano, que provoca cerca del 20 por ciento de nuestro actual calentamiento global. La vida química del metano en la atmósfera es de sólo diez años, por lo que su concentración podría remitir rápidamente a sus niveles preindustriales al cesar las emisiones. Pero la mala noticia es que hay reservas masivas de metano en forma de hidratos de metano en el piso oceánico y congelados en el permafrost. Incrementos posteriores de temperatura pueden desestabilizar estas reservas y liberar gran parte de ese metano a la atmósfera. “Podemos dejar de emitir metano, pero quizá ya hemos disparado el cambio climático hasta el punto en que el metano puede ser liberado por otros procesos sobre los que no tenemos control,” dice Pieter Tans, científico atmosférico en la NOAA en Boulder.

Nadie sabe qué tan cerca está la Tierra de ese umbral. “No lo notamos aún en nuestra red global de monitoreo, pero hay evidencias locales de que hay cierta desestabilización en los suelos permafrost y de que hay emisiones de metano,” apunta Tans. Por otra parte, Solomon encuentra pocas evidencias claras de que estemos cerca de ese umbral global.

Tomando en cuenta todo lo anterior, pasarán a lo sumo sólo unas decenas de miles de años para que se desvanezca por completo casi cualquier rastro de nuestra actual predominancia. Un alienígena que visitara la Tierra dentro de cien mil años no hallaría señales evidentes de que aquí hubo alguna vez una civilización avanzada.

Pero si los extraterrestres tuvieran equipos suficientemente buenos podrían encontrar débiles huellas de nuestra presencia. De entrada, los registros fósiles mostrarían una extinción en masa con centro en la fecha actual, incluyendo la súbita desaparición de grandes mamíferos en Norteamérica al final de la última edad de hielo. Pequeñas excavaciones podrían también evidenciar intrigantes rastros de una civilización inteligente perdida tiempo atrás, como las densas concentraciones de esqueletos de un gran mono bípedo, clara y deliberadamente enterrados, algunos con dientes de oro u ornamentos funerarios como joyas.

Y si los visitantes excavaran en uno de los rellenos sanitarios actuales, podrían hallar fragmentos de vidrio y plástico –e incluso tal vez papel– que testificaran nuestra presencia. “Yo podría garantizar virtualmente que habría algo”, comenta William Rathje, arqueólogo de la Universidad de Stanford en California quien ha



excavado muchos rellenos sanitarios. “La preservación de las cosas es realmente sorprendente. Consideramos los artefactos muy poco permanentes, pero en ciertos casos van a durar largo tiempo.”

Núcleos de sedimentos oceánicos mostrarán un breve periodo en el cual se depositaron cantidades masivas de metales pesados como el mercurio, reliquia de nuestra efímera sociedad industrial. La misma capa de sedimentos presentará una concentración de isótopos radiactivos producidos por la fusión de los reactores después de nuestra desaparición. La atmósfera conservará trazas de algunos gases que no aparecen naturalmente, especialmente perfluorocarbonos como el CF_4 que tiene una vida media de decenas de miles de años. Finalmente, un breve pulso de ondas de radio de un siglo de duración irradiará por siempre a través de la galaxia y más allá, lo que será una prueba –para quien pueda y quiera escuchar— de que alguna vez tuvimos algo que decir y la manera de decirlo.

Pero serán endebles souvenirs, recuerdos casi patéticos de una civilización que alguna vez se consideró a sí misma como el pináculo de la evolución. En unos millones de años la erosión y posiblemente otra u otras edades de hielo habrán obliterado la mayor parte de esos frágiles rastros. Si alguna vez evolucionara otra especie inteligente en la Tierra –y esto no es de ningún modo una certeza, considerando cuánta vida floreció antes de nuestra aparición— bien podrían no sospechar que estuvimos aquí, salvo por ciertos peculiares fósiles y relictos osificados. La modesta y perversamente reconfortante realidad, es que la Tierra habrá de olvidarnos muy rápidamente.

Asociación Geotérmica Mexicana: Congreso anual 2007 y XV Asamblea General Ordinaria

El 21 de septiembre de 2007 se llevaron a cabo el congreso anual y la XV Asamblea General Ordinaria de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM) en las instalaciones del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., México, que maneja la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).



Hubo 35 participantes provenientes de la propia CFE, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Fueron recibidos por el Presidente y Vicepresidente de la AGM, José Luis Quijano León y Raúl Maya González, respectivamente, así como por el residente de Los Humeros, Abelardo Vázquez Sandoval.

Se presentaron y discutieron los siguientes diez trabajos técnicos (el autor que aparece subrayado fue quien lo presentó:

1. Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos.
Autores: Javier Lermo, Yanet Antayhua, Luis Quintanar y Cecilia Lorenzo.
2. Características mineralógicas y microtermo-métricas del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue., México.
Autores: Georgina Izquierdo, Víctor M. Arellano y Alfonso Aragón.
3. Condiciones termodinámicas mínimas del yacimiento para producir vapor en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC.

Autor: Marco Helio Rodríguez Rodríguez.

4. Cambios químicos en fluidos de pozos del campo geotérmico de Los Humeros: Evidencia de recarga profunda.

Autores: Rosa María Barragán Reyes, Víctor Manuel Arellano Gómez, Magaly Flores Armenta y Rigoberto Tovar Aguado.

5. Modificaciones a las estructuras caldéricas de Los Humeros y Los Potreros.

Autor: Fidel Cedillo Rodríguez.

6. Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acozulco, Pue., México.

Autores: Javier Lermo, Yanet Antayhua, Isabel Bernal, Saúl Venegas y Jesús Arredondo.

7. La invasión de fluidos geotérmicos en yacimientos de hidrocarburos.

Autor: Mario César Suárez Arriaga.

8. Análisis de datos de producción y condiciones termodinámicas del fluido de alimentación de pozos de Los Humeros, Pue.

Autores: Víctor Manuel Arellano Gómez, Alfonso Aragón Aguilar, Rosa María Barragán Reyes, Magaly Flores Armenta, Miguel Ramírez Montes y Rigoberto Tovar Aguado.

9. Estudio con un trazador de vapor en la zona aledaña al pozo Az-64, en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Autores: Eduardo R. Iglesias, Magaly Flores Armenta, José Luis Quijano León, Marco A. Torres Rodríguez, Rodolfo J. Torres y Neftalí Reyes Picasso

10. 1997-2006: Una década de generación geotermoeléctrica en México.

Autor: Luis C.A. Gutiérrez Negrín.

Como se ha venido acostumbrando, la mayor parte de estos trabajos se irán publicando en esta revista, pero además fueron incluidos en un disco compacto con las memorias del congreso, el cual se entregó a todos los asistentes.



Foto: Daniel González García

Arturo González (derecha) recibe el Premio Pathé 2007 de manos de Sergio Mercado.

Después de las presentaciones dio inicio la asamblea general, conducida por el presidente de la asociación. Se aprobó la minuta de la asamblea anterior, se presentaron los informes del Presidente y del Tesorero, y se procedió a la entrega del Premio Pathé 2007. Desde el año 2005 la AGM ha venido entregando este reconocimiento a personas que de manera destacada se han desempeñado un mínimo de 15 años en el ámbito de la geotermia mexicana y cuya trayectoria, merecimientos o aportes se consideren relevantes. Este año el premio le correspondió al Ing. Arturo González Salazar, y fue entregado por el beneficiario del Premio Pathé 2006, el Ing. Sergio Mercado González.

Arturo González Salazar es ingeniero geólogo con casi 50 años de experiencia profesional. Trabajó para

la CFE de 1956 a 1988, siendo responsable de los estudios iniciales de los campos geotérmicos de Los Humeros y de La Primavera (hoy Cerritos Colorados). Fue Subjefe del Departamento de Geotermia de la CFE entre 1972 y 1976, y jefe del mismo de 1977 a 1981. Al crearse la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos en 1981 fue designado como Subgerente de Estudios, cargo que conservó hasta su jubilación en 1988. Trabajó como consultor independiente entre 1988 y 1991, y en 1992 fundó con otros colegas la compañía de consultoría Geocónsul, SA de CV, la cual dirige hasta la fecha.

Uno de los aspectos relevantes informados en la asamblea fue la renovación del convenio de afiliación de la AGM a la *International Geothermal Association* (IGA), que habría expirado en diciembre de 2007. El nuevo acuerdo tiene una vigencia de cuatro años (2008 a 2012), habiendo sido firmado por el Presidente del Comité de Membresías de la IGA, Ruggero Bertani, y por el Presidente de la AGM, José Luis Quijano. Mediante este convenio, la AGM continúa siendo reconocida como la asociación geotérmica representativa de la IGA en México, y todos sus miembros son también automáticamente miembros de la IGA.

Como cada año, el evento concluyó con la tradicional foto, tomada esta vez en la entrada de las oficinas de la CFE en el campo de Los Humeros.



El Mundo de la Energía

(Con información recopilada por Alfredo Mañón Mercado)

□ Uso de la bioenergía en México

La revista “Energy”, editada por Elsevier, publicará un interesante artículo titulado “Estudio Prospectivo del Uso de la Bioenergía en México”, realizado por los investigadores Jorge Islas y Fabio Manzini, del Centro de Investigación en Energía, y Omar Masera del Centro de Investigación en Ecosistemas de la UNAM. El estudio analiza el impacto que tendría, en el periodo que va de 2005 a 2030, la introducción de bioenergéticos en la oferta de energía primaria del país. Los investigadores hacen proyecciones bajo dos escenarios, uno moderado y otro ambicioso, y los comparan con el escenario base, en el que las fuentes de energía primaria siguen siendo prácticamente las mismas de ahora.

El estudio está enfocado a tres de los sectores que demandan energía primaria: generación de electricidad, transporte y consumo doméstico; este último en el ámbito rural, donde la leña (u otros residuos orgánicos) sigue siendo una fuente tradicional de energía primaria. Se hace una proyección de la participación de los bioenergéticos en estos sectores, en el año 2030, así como de la reducción de emisiones de CO₂ que la acompañan.

Como en toda proyección, se asume una serie de supuestos sobre la tasa de crecimiento de la demanda, la maduración de tecnologías, la regulación legal y los incentivos financieros. En cuanto a los dos últimos, los autores asumen que México contará en un futuro próximo con una legislación favorable a la introducción de bioenergéticos --lo cual ya ocurrió en parte con la aprobación por el congreso de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos--, y con un programa de incentivos fiscales y financieros. El crecimiento de la demanda de energía se supone igual al crecimiento del Producto Interno Bruto (4% anual en promedio). En cuanto a tecnología, los autores apuestan a que, en el sector de generación de electricidad, se

utilizarán plantas de tipo Ciclo Combinado con Gasificación de Biomasa Integrada (BIGCC, por sus siglas en inglés), además de las existentes actualmente con base en biogás e incineradores de basura; el etanol y el biodiesel tendrán una participación importante en el sector transporte, y en el medio rural se difundirá el uso de estufas altamente eficientes y de biogas.

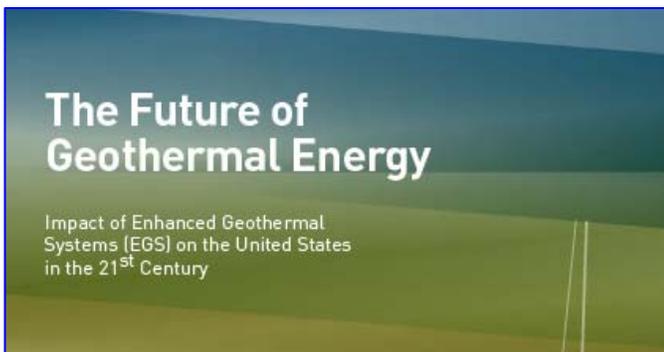
Bajo estos supuestos y en el escenario optimista, prevén una participación de los bioenergéticos, en los tres sectores mencionados, del orden de 55.9 petajoules (PJ) en 2015 y de 2070 PJ en 2030, que sería equivalente al 0.44% y al 16.17%, respectivamente, del consumo total de energía de esos sectores. En cuanto a las emisiones evitadas de CO₂, los autores estiman valores de 2.63 millones de toneladas en 2015 y de 87.44 millones de toneladas en 2030, que equivalen al 0.54% y 17.84% de las emisiones respectivas en el escenario base. En el escenario moderado, estas cifras son aproximadamente la mitad.

Los autores consideran que un uso en mayor escala de los bioenergéticos permitirá la diversificación energética --lo cual es prioritario si consideramos que las reservas probadas de gas e hidrocarburos podrían agotarse en los próximos 10 años--, contribuirá significativamente a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero y, también muy importante, podría ser una vía efectiva para el desarrollo de medio rural. (Nota de José Luis Quijano-León.)

□ Informe del Instituto Tecnológico de Massachussets sobre el futuro de la energía geotérmica en Estados Unidos

El Instituto Tecnológico de Massachussets ([MIT](#)) publicó a principios de 2007 un [informe](#) de 372 páginas preparado por un grupo interdisciplinario de 18 científicos, representantes de la industria y del gobierno de los Estados Unidos, para analizar el futuro de la geotermia en ese país.

La energía geotérmica es un enorme e inagotable recurso de energía limpia que puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles, explica el reporte. La energía almacenada en las rocas de la corteza, puede proveer de una porción sustancial de la electricidad que requieren los Estados Unidos, a precios competitivos y con un mínimo impacto ambiental. El estudio analiza la factibilidad técnica, el impacto ambiental y la viabilidad económica de la tecnología bautizada como “Sistemas Geotérmicos Mejorados” (EGS por sus siglas en inglés) que incrementa la fracción del recurso geotérmico que puede ser recuperado comercialmente.



El panel de expertos recomienda evaluaciones detalladas en sitios específicos del recurso geotérmico y pruebas de cinco años de duración en varios sitios para demostrar a escala comercial la viabilidad de cada uno. Explorar y probar yacimientos geotérmicos más profundos y adaptar las políticas locales y nacionales para alentar el desarrollo geotérmico son algunas de las conclusiones del informe, que también exhorta a establecer un programa de investigación, de varios años de duración, en las áreas de ciencias de la tierra, exploración profunda, perforación geotérmica y conversión de energía, apoyado por el análisis constante de resultados.

El informe destaca que se requiere una inversión pública de mil millones de dólares en Investigación y Desarrollo para superar los obstáculos que impiden el aprovechamiento de este recurso a gran escala, ya que el potencial geotérmico para el año 2050 podría alcanzar hasta los 100 GW, con un menor impacto ambiental.

Pero, a pesar de las ventajas que tiene la geotermia, los autores del informe afirman que no

existen las iniciativas necesarias para la potenciación del desarrollo de las fuentes geotérmicas en Estados Unidos. No ha sucedido lo mismo en otros países, donde se ha dado un avance significativo en este sentido, como en Soultz (Francia), bajo los auspicios de la Unión Europea; o en Australia, con patrocinadores privados. En ambos sitios, los resultados obtenidos han superado las expectativas, señalan los investigadores.

Fuente:

http://www.renewableenergyfocus.com/articles/wave/prod_news/070131geo.html

Más información en:

http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf

http://www.tendencias21.net/EE-UU-se-plantea-una-posible-implantacion-masiva-de-la-energia-geotermica_a1466.html

http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hdr_pres_en.pdf

http://www.ambientum.com/revista/2004_07/GEO TERMICA_imprimir.htm

□ **Aumenta el uso de bombas de calor geotérmico en Estados Unidos**

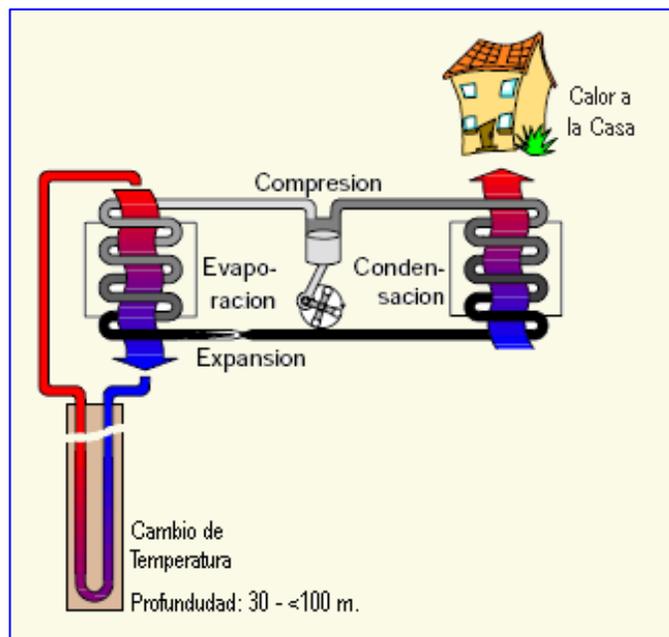
El uso de bombas de calor geotérmico en los Estados Unidos ha crecido 450% en los últimos 15 años. Estas bombas, que utilizan el calor de la tierra, han suministrado 25.3 petaJoules (PJ) de energía en 2005 en Estados Unidos, de acuerdo con el informe *Survey of Geothermal Heat Pump Shipments, 2005* que preparó el Departamento de Energía de ese país. Quince años atrás, esta cifra era de 5.7 PJ.

Otros 9.3 PJ fueron aprovechados en uso directo de la energía geotérmica, lo que incluye aplicaciones como calefacción, calentamiento de estanques en acuicultura, calentamiento de invernaderos y secado agrícola. Esto representa casi el doble de los 5.1 PJ en 1990.

Las compras de bombas de calor geotérmico aumentaron un 9% en 2005 con respecto a 2004, mientras que la capacidad promedio de las unidades disminuyó de 4.6 toneladas en 1999 a 3.4

toneladas en 2005, lo que indica que el empleo en comercios y escuelas es mayor que en grandes instalaciones.

El 75 % de las bombas se instalaron en las regiones del sur de Estados Unidos, que tienen el perfil de temperatura más favorable para la operación geotérmica, o en el cercano oeste donde es más fácil el acceso a los terrenos para instalar sistemas de ciclo cerrado.



La mayoría de las bombas de calor en Estados Unidos se diseñan para cubrir el pico de enfriamiento, y por lo mismo están sobredimensionadas para calefacción, lo que significa que la energía consumida por las unidades en este país funciona hasta cinco veces más que las bombas de calor para calefacción en Europa.

Fuente:

<http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/pa/ge/ghpsurvey/geothermalrpt.pdf>

Más información:

<http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/pa/ge/ghpsurvey/ghpsurvey.html>

<http://enerxia.wordpress.com/energias-renovables-introduccion/energia-geotermica-breve-introduccion/geotermica-bomba-de-calor/>

<http://www.ubeg.de/Downloads/EnergiaGeotermica.pdf>

<http://www.casasactuales.com/?p=14>

http://www.georenova.com/energ_geot.html

Las fuentes renovables podrían suministrar más de la mitad de la energía eléctrica generada en el mundo en 2050

El informe *Energy [R]evolution: A sustainable World Energy Outlook*, preparado por Greenpeace Internacional y el Consejo Europeo de Energía Renovable (European Renewable Energy Council, EREC), concluye que es económicamente factible reducir las emisiones globales de CO₂ en casi el 50% en los próximos 50 años, mediante el empleo masivo de fuentes de energía renovable para generar electricidad, y que lo único que se requiere es aplicar las políticas adecuadas.

El mercado global de la energía renovable está creciendo aceleradamente. En 2006 su volumen de ventas fue 38 mil millones de dólares, 26% más que el año anterior. En la próxima década muchas centrales eléctricas que operan en los países de la OCDE llegarán al final de su vida técnica útil y deberán ser reemplazadas. Las fuentes de energía renovable están ya disponibles, en muchos casos a menor costo, y sin las consecuencias negativas para el medio ambiente que conlleva la explotación, el transporte y el procesamiento del combustible fósil.

alternative scenario

table 21: electricity generation

TWh/a	2003	2010	2020	2030	2040	2050
Total generation	16,662	17,308	20,234	23,292	27,018	30,935
Fossil	11,015	11,110	11,215	10,624	10,003	9,491
Coal	5,841	5,563	4,759	3,500	2,974	2,695
Lignite	714	580	362	160	35	0
Gas	3,295	4,179	5,666	6,758	6,921	6,775
Oil	1,165	788	428	206	73	21
Nuclear	2,641	2,094	1,331	65	0	0
Renewables	3,007	4,104	7,688	12,603	17,015	21,444
Hydro	2,659	3,127	3,656	4,035	4,402	4,709
Wind	64	346	2,327	4,494	5,866	7,149
PV	1	28	269	1,003	1,835	2,835
Biomass	228	482	1,000	1,696	2,355	2,942
Geothermal	54	107	209	362	556	726
Solar thermal	1	9	196	949	1,891	2,933
Ocean energy	1	5	31	64	111	151

El documento indica que en 2003 la generación eléctrica mundial fue del orden de 16,662 terawatts-hora (TWh), 18% de la cual provino de fuentes de energía renovable, principalmente

centrales hidroeléctricas. Pero estima que aunque en 2050 la generación será de casi el doble (casi 31 mil TWh), las fuentes de energía renovable podrían representar el 69% del total, con centrales eololéctricas suministrando el 15% (ver cuadro).

Fuente:

http://www.renewable-energy-world.com/display_article/284685/121/ARCHI/none/none/1/Energy-%5Br%5Devolution:-A-sustainable-world-energy-outlook/

Más información:

<http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/energyrevolutionreport.pdf>

□ Futuros aerogeneradores de 7.5 MW de capacidad

El fabricante de aerogeneradores Clipper Windpower, con sede en California ha llegado a un acuerdo de colaboración en el Reino Unido para desarrollar un aerogenerador de 7.5 MW para aplicaciones marinas.



Para desarrollar esta formidable máquina (hasta la fecha, la mayor máquina en operación en el mundo es de 5 MW), Clipper ha establecido lo que denomina un Centro de Excelencia para la Energía Eólica Marina en la localidad Blyth, al noreste de Inglaterra. El proyec-

to, denominado *Britannia Project*, recibe el apoyo de la Agencia de Desarrollo Regional del Noreste (de Inglaterra) mediante una inversión de 7.5 millones de euros.

El desarrollo de la máquina partirá del diseño y tecnología del modelo Clipper Liberty de 2.5 MW, comercializada desde finales de 2006 y ya con cerca de 100 MW en operación. Esta máquina ha sido oficialmente reconocida por el Departamento

de Energía federal de EUA por su confiabilidad, eficiencia y bajo costo, según señala Clipper.

Fuente:

<http://www.energias-renovables.com/paginas/ContenidoSecciones.asp?ID=9&Cod=11429&Tipo=&Nombre=Eólica>

Más información:

http://www.ft.com/cms/s/0/bba278c4-72cd-11dc-b7ff-0000779fd2ac.html?nclick_check=1

<http://www.clipperwind.com>

http://www.clipperwind.com/pr_100807.html

<http://www.investeastofengland.com/news.asp?id=661&s=Energy>

□ Compañías españolas invertirán en centrales eololéctricas en Baja California

La tercera compañía eléctrica española, Unión Fenosa, ha anunciado que planea invertir entre 575 mil y mil millones de euros en la construcción de centrales eólicas en México, principalmente en el norte del país, con un total de 500 a 1000 MW de capacidad. La energía producida se vendería principalmente al estado norteamericano de California, concretamente a las compañías *Pacific Gas and Electric* (PGE) y *Southern California Edison* (SCE).

El proyecto eólico más relevante es el de La Rumorosa, ubicado en el municipio de Tecate, Baja California, cerca de la frontera con California, sitio considerado con el segundo mayor potencial eololéctrico de México. La central tendría una potencia de 250 MW en una primera fase, ampliables a 500 MW.

Por otro lado, la empresa *Sempre Energy* anunció la construcción de una central eólica en las inmediaciones del ejido Jacume, también en la zona de La Rumorosa. La compañía anunció que desarrollará proyectos de energía renovable en ambos lados de la frontera México-Estados Unidos, empezando con esta central que en principio tendrá una capacidad de 250 MW, con un costo inicial de 400 millones de dólares. La planta podría iniciar operaciones durante la segunda mitad del año 2010 y constará de 125 aerogeneradores que se instalarán a lo largo de las

montañas que se encuentran en la parte oriente de la Sierra Juárez, aproximadamente a 50 kilómetros al oeste de la ciudad de Mexicali. La idea es que la energía se exporte en su mayor parte a Estados Unidos, para lo cual la compañía está buscando contratos de suministro con empresas distribuidoras que operan en California.

Este sería el segundo proyecto de *Sempra Energy* en Baja California, quien construye actualmente en Ensenada una planta regasificadora de gas natural, Energía Costa Azul, cuya operación se estima arranque en 2008.

Fuentes:

<http://www.unionfenosa.es>

http://public.sempra.com/newsreleases/viewpr.cfm?PR_ID=2181&Co_Short_Nm=SE

http://public.sempra.com/newsreleases/viewPR.cfm?PR_ID=2183&Co_Short_Nm=SGen

Más información:

<http://www.lukor.com/not-neg/empresas/0706/07181044.htm>

<http://www.elvigia.net/noticias/?seccion=generales>

<http://www.elvigia.net/noticias/?seccion=generales&id=36478>

<http://cannonpowercorp.com/>

❑ **Dos cadenas de tiendas departamentales utilizarán energía eólica en México**

Energies Nouvelles, subsidiaria de la compañía paraestatal francesa *Electricité de France* (EDF), invertirá 140 millones de dólares en la construcción de una planta eoloeléctrica localizada en la zona de La Venta, Oaxaca, que tendrá una capacidad de 67.5 MW. La planta será operada por Eléctrica del Valle de México, una empresa del grupo *Energies Nouvelles*, quien cuenta con los permisos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para desarrollar un total de 180 MW eólicos en esa zona.

La cadena de tiendas Wal-Mart de México (Walmex) comprará toda la energía eléctrica que se genere en esa central eólica, como parte de un plan para reducir sus costos. Walmex opera 897 unidades comerciales en cinco diferentes formatos de tiendas y restaurantes, y espera que el proyecto le permitirá cubrir una tercera parte de sus

necesidades de energía eléctrica y ahorros de hasta 2.5 millones de dólares al año, ya que podrá abastecer a unas 350 unidades de negocio de la región central de México. Se espera que la central empiece a operar en 2008.



Por su parte, la empresa mexicana de tiendas departamentales Soriana inició un proyecto de autogeneración de energía eléctrica usando tecnología eólica, con el fin de optimizar el gasto por consumo de energía eléctrica, uno de los rubros más significativos en el gasto de operación de la empresa y cuyos precios han crecido por arriba de la inflación. Este proyecto se desarrollará en asociación con la compañía Vientos del Istmo, SA de CV, con una central ubicada en el municipio de San Dionisio del Mar, en el estado de Oaxaca.

Vientos del Istmo ya tiene los permisos y la autorización de la CRE para generar 216 MW, con un potencial futuro que podría llegar hasta los 396 MW. Se estima que la planta comenzará a operar en el segundo semestre de 2009, requiriendo una co inversión aproximada de 300 millones de dólares. La central podrá satisfacer a mediano plazo las necesidades de energía eléctrica de las tiendas Soriana en todo el país.

Fuentes:

<http://www.cnnexpansion.com/negocios/wal-mart-mexico-utilizara-energia-eolica/view>

<http://www1.soriana.com/default.asp?p=7403>

Más información:

<http://www.edf-energies-nouvelles.com/>

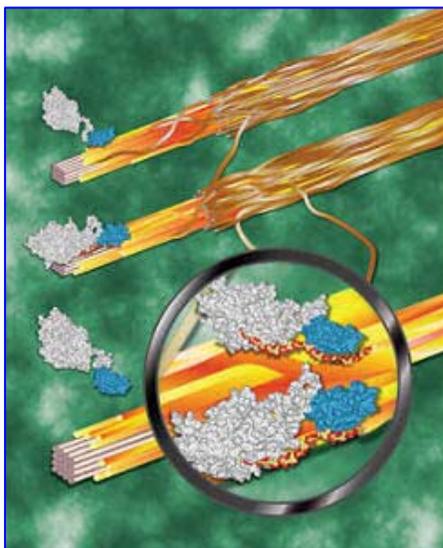
<http://www.boursorama.com/forum/message.phtml?file=356639962&pageForum=1>

<http://www.reuters.com/article/companyNewsAndPR/idUSN1533940220070215>

<http://www.planetaazul.com.mx/www/2007/04/25/pega-cfe-a-planes-eolicos-2/>

□ Nuevas enzimas vegetales útiles para producir etanol

Existe un creciente convencimiento entre los expertos de que el etanol obtenido del maíz no es adecuado como una solución a largo plazo, ni tampoco resulta ambientalmente sustentable. Por eso se están volcando hacia la celulosa como una alternativa.



Aún no es posible producir etanol a partir de celulosa en cantidades masivas con precios competitivos con el etanol procedente del maíz. Y sin etanol celulósico, no se podrá cumplir en algunos países el objetivo de reducir el uso del petróleo, en opinión de diversos expertos.

Un paso crítico en la producción de etanol celulósico es el que implica la degradación del material componente de la pared celular del vegetal, y la fermentación de los azúcares que se

liberan. Las tecnologías actuales emplean enzimas microbianas para digerir la celulosa de las gramíneas y de los árboles de crecimiento rápido.

Pero ahora se ha descubierto una nueva clase de enzimas vegetales con una estructura similar, que ofrecen nuevas propiedades potenciales para producir etanol, incluso con mayor eficacia. Y es probable que existan más juegos de enzimas vegetales por descubrir, capaces de mejorar la eficiencia de la degradación de la celulosa.

El Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos ha decidido aportar casi treinta y cuatro millones de dólares para apoyar el desarrollo de estas enzimas. La idea es que el etanol pueda producirse a partir de materiales no alimenticios y de la basura agrícola, como tallos de maíz, pastos y hierbas de pradera.

Fuentes:

<http://www.solociencia.com/quimica/07060403.htm>, <http://energy.gov/news/5340.htm>

Más información:

<http://www.earthtimes.org/articles/show/57970.html>

<http://www.investorideas.com/News/r052907a.asp>

<http://www.uacj.mx/IIT/CULCYT/Enero-Febrero2007/REVISTA18.PDF>

<http://www.energy.gov/print/4827.htm>

<http://www.rangefuels.com/>

<http://www.ethanolproducer.com/>

http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-04/cuns-rfp042707.php

Geothermal History

Geothermal History, es una columna regular del **Boletín** del GRC (*Geothermal Resources Council*), coordinada por nuestra colaboradora **Susan Hodgson**, quien ahora es también la editora de ese Boletín. Susan solicita permanentemente colaboraciones de todo el mundo. Si usted tiene alguna historia, anécdota o foto, relativa a la geotermia, compártala con la comunidad y envíele un mensaje a la dirección:

cosmos@dcn.org

INSTRUCCIONES DE PUBLICACIÓN EN LA REVISTA GEOTERMIA

Geotermia está abierta a la participación de investigadores de instituciones tanto nacionales como del extranjero quienes deben dirigir sus contribuciones a:

GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.

Morelia, Mich., C.P. 58290, México

Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

luis.quijano@geotermia.org.mx, luis.gutierrez03@cfе.gob.mx, luis.gutierrez@geotermia.org.mx

Los trabajos deberán cumplir con las siguientes instrucciones de publicación.

1. El artículo debe ser inédito y relacionado con la geotermia, las fuentes alternas no convencionales de energía o con ramas afines.
2. Enviar una copia impresa a doble espacio, así como disquete con el archivo en formato MS-Word. También puede enviarse el archivo por correo electrónico a las direcciones indicadas arriba. Se aceptan trabajos en español con resumen en inglés, o en inglés con resumen en español.
3. Las tablas, cuadros y figuras deberán incluirse al final del texto. Las figuras y gráficas pueden ser en color o en blanco y negro, tener buena calidad y no rebasar el tamaño carta. Su cantidad deberá ser la suficiente para la comprensión o ilustración del trabajo expuesto. Deberán incluirse en las copias impresas, al final del texto, así como en el disquete en forma de archivos independientes en formato de imagen (*.gif, *.tif, *.jpg) que puedan importarse como tales desde MS-Word.
4. *Geotermia* es una revista virtual que se publica en formato *.pdf en el portal interno de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos y en otros portales públicos. Por lo tanto, es importante que todas las figuras y gráficas tengan la resolución suficiente para poder apreciarse al convertirse a archivos de imagen.
5. Todo artículo será sometido a revisión y arbitraje de un mínimo de dos especialistas en la materia. Para facilitar la imparcialidad de la revisión se mantendrá el anonimato entre autores y árbitros. Se enviarán reconocimientos escritos a quienes colaboraron como árbitros.
6. Se ofrecerá apoyo especial a los autores sin hábitos de publicar resultados por no constituir la publicación una parte rutinaria de su trabajo, y que, en consecuencia, requieran de indicaciones adicionales. El Consejo Editorial se encargará de hacer las modificaciones o correcciones pequeñas que no justifiquen la aplicación de un nuevo arbitraje.
7. El contenido de los trabajos deberá abordar los temas que se indican a continuación. Se subrayan las partes consideradas como indispensables, aunque su contenido pueda aparecer bajo otra sección o con otro título. Las otras secciones son opcionales, aunque pudiera haber otras a juicio del autor: Título, Autor, Adscripción laboral, Dirección de correo electrónico, Resumen en español, Palabras Clave en español, Título en inglés, Resumen (Abstract) en inglés, Palabras Clave (Keywords) en inglés, Antecedentes o Introducción, Objetivo, Metodología, Datos, Procesamiento, Interpretación, Interpretaciones alternativas, Conclusiones, Verificación, Agradecimientos, Referencias, Apéndices.
8. Todas las referencias deberán estar citadas en el texto y todas las citas deberán estar incluidas en las referencias. En el texto se empleará el sistema Harvard (apellido y año): "Algunos autores (González, 1995)...", o bien "González (1995) reporta que...". En caso de dos autores la cita deberá incluirlos a ambos (González y Rodríguez, 1995) y en caso de más autores deberá utilizarse la convención *et al.* (González *et al.*, 1995). La lista de referencias irá en orden alfabético y deberá incluir a todos los autores con todos los detalles de la publicación; si se emplean abreviaturas de publicaciones científicas, deberán estar de acuerdo con el *World List of Scientific Periodicals*. Solamente las iniciales del primer autor irán después del

apellido, y se colocará entre paréntesis el año de la publicación después del apellido del último autor. El título de la revista o libro referenciado deberá escribirse en cursivas. Ejemplos:

Cedillo-Rodríguez, F. (1999). Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia*, Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García (1984). Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L. (1970). *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.

9. Si lo desea, puede solicitar una copia de los formatos de arbitraje y utilizar como guía para el contenido de su contribución los artículos ya publicados en esta revista.

10. Eventualmente aparecerá como parte de la revista una sección intitulada FORO, la cual dará cabida a artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos precedentes, pero que a juicio del Consejo Editorial pueden resultar de interés para los lectores de la misma. Estas colaboraciones no serán sometidas a arbitraje técnico. Si desea que su colaboración sea considerada para publicarse en FORO, por favor indíquelo así al remitirla.

DIRECTIONS FOR CONTRIBUTORS

Geotermia is open to Mexican and foreign contributors, who should send all contributions to:

GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.

Morelia, Mich., C.P. 58290, México

Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

luis.quijano@geotermia.org.mx, luis.gutierrez03@cfe.gob.mx, luis.gutierrez@geotermia.org.mx

Contributions must follow these guidelines:

1. A submitted paper must be unpublished and related to geothermics, nonconventional energy sources or similar subjects.
2. Submit a printed copy, double spaced, and a diskette with the file in MS-Word format. The file may be sent by e-mail to an e-address indicated above. Contributions in Spanish with abstracts in English, or in English with abstracts in Spanish, are acceptable.
3. Tables, figures and graphs must be placed at the end of the text. They must be of good quality, either in color or black and white, and not larger than letter-sized paper. Include all tables, figures and graphs needed by a reader to understand the paper. Place them on the diskette as independent files in image-format (*.gif, *.tif, *.jpg), which can be imported from MS-Word.
4. *Geotermia* is a digital magazine published in a *.pdf format at the internal website of the Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos and at other public websites. Therefore, all figures and graphs must have enough resolution to be clear when they are converted to image-files.
5. All contributions will undergo review and arbitration by at least two specialists in the field. To encourage fair evaluations, the authors will receive anonymous reviews. The reviewers will receive an acknowledgement letter from the editorial board.

6. *Geothermia* offers special support to first-time authors for whom publishing papers is not part of their jobs. The editorial board can make small modifications or corrections to such papers without a new peer-review process.
7. All papers must include the following sections. Those considered as indispensable are underlined, yet they can be included under other chapters or subtitles. The other parts are optional, plus authors can include additional sections: Title, Author(s), Company or institution, Address, Abstract in Spanish, Keywords in Spanish, Title in English, Abstract in English, Keywords in English, Introduction or background, Objective, Methodology, Data, Processing, Interpretation, Alternative interpretations, Conclusions, Verification, Acknowledgement, References, Appendix.
8. All references must be cited in the text, and all citations must be included in the References. In the text, the Harvard citation system (last name and year) must be used: "Some authors (González, 1995)...", or: "González (1995) indicates that..." In the case of two authors, the citation must include both (González and Rodríguez, 1995), and in the case of more than two authors the convention *et al.* (González *et al.*, 1995) must be used. The list of references must be arranged alphabetically and include all the authors and details of the cited publication. All abbreviations must be from the *World List of Scientific Periodicals*. Initials of the first author must follow the last name, putting into parenthesis the year of publication after the last author. The title of a magazine or book must be written in italics. Examples:

Cedillo-Rodríguez, F. (1999). Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geothermia*, Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García (1984). Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L. (1970). *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.
9. You may ask for a copy of the review of any paper published in *Geothermia* and use it as a guide for your contribution.
10. Eventually, a section named FORO will constitute the last part of the magazine. The section will include contributions, notes and essays that may or may not meet any or all of the stipulations for papers, but that the editorial board considers of interest to the readers. Contributions included in FORO will not undergo peer review. If you want a contribution be placed in FORO, please indicate this upon submission.