

REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA	
ISSN 0186-5897	
Volumen 20, No. 2	
Julio-Diciembre de 2007	
CONTENIDO	
Editorial	1
Simulación numérica de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC A. García, J.I. Martínez, A.F. Hernández, M. Ceceñas, R. Ovando, E. Salaices, I. Canchola, O. Mora, S. Gutiérrez, C. Miranda, M. Hernández, y S. López	2
Ensayos de polimerización y depósito de sílice, pruebas de radiotrazadores y simulación numérica en el campo geotérmico de Berlín, El Salvador, Centroamérica Marlon R. Castro Fuentes, Dina López, Jaime A. Reves López y Jorge Ramírez Hernández	8
Modelación de la subsidencia en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC Olga Sarychikhina, Ewa Glowacka, Miguel Guzmán y Francisco Suárez	27
Estimación del flujo de calor entre el pozo y la formación a partir de registros de presión: simulación de pozos	36
P. Sánchez-Upton, E. Santoyo, M.H. Rodríguez-Rodríguez	
A preliminary interpretation of gas composition in the CP IV sector wells, Cerro Prieto geothermal field, Mexico Rosa María Barragán Reyes, Víctor M. Arellano Gómez, Enrique Portugal Marín, Alfredo Pérez	46
Tres años de monitoreo sísmico pasivo en el campo geotérmico Los Azufres, Michoacán Carlos Valdés González y Héctor Pérez Esquivias	55
Análisis de la evolución productiva del pozo M-19A del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC Marco Holio Podríguez Podríguez y Francisco Pomero Píos	66
Foro	76
Madia ambianta, gaotarmia y tama da conciancia	70
Sergio Mercado, Víctor M. Arellano y Rosa María Barragán	//
Convocatoria al Congreso Anual 2007 y a la XV Asamblea General de la Asociación Geotérmica Mexicana	87
El Mundo de la Energía (Con información de Alfredo Mañón Mercado)	89

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: Lucina Arce Ávila

Oficinas: Alejandro Volta 655, Col. Electricistas Morelia, Mich., 58290 Tel. (443) 322-7072 Correos: <u>luis.gutierrez03@cfe.gob.mx</u>, <u>luis.gutierrez@geotermia.org.mx</u>, <u>luis.quijano@geotermia.org.mx</u>

Editorial

Presentamos en este número siete interesantes trabajos sobre los dos principales campos geotérmicos en explotación de México, el de Cerro Prieto y el de Los Azufres, y sobre el campo geotérmico de Berlín, en El Salvador, así como un artículo sobre simulación de pozos de aplicación general.

La mayor parte de esos trabajos se presentaron en el congreso anual del año pasado de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), realizado en las instalaciones del campo de Cerro Prieto. Uno de ellos es el de Alfonso García y colaboradores, sobre la simulación numérica del comportamiento de la red de vaporductos en Cerro Prieto, que complementa un trabajo previo sobre el modelo hidráulico de esa misma red publicado en el número inmediato anterior de **Geotermía** (Vol. 20, Número 1). Los demás trabajos presentados en el congreso son los de Marlon Castro y asociados sobre el campo de Berlín, el de Olga Sarychikhina y colaboradores sobre la subsidencia en Cerro Prieto, el del grupo encabezado por Rosa María Barragán sobre la composición gaseosa de pozos del sector Cerro Prieto IV, y el de Marco Helio Rodríguez y Francisco Romero sobre el longevo pozo productor M-19A del mismo campo de Cerro Prieto que lleva 32 años en servicio --período en el cual ha producido más de 40 millones de toneladas de fluidos geotérmícos. En la sección del Foro se incluye un inquietante ensayo de Sergio Mercado y colaboradores, el cual también se presentó en el congreso mencionado.

Con esas colaboraciones concluimos la publicación de los trabajos presentados en extenso en el Congreso Anual 2006 de la AGM, y quedamos preparados para publicar los que se presenten en el congreso de este año, programado para realizarse el 21 de septiembre en las instalaciones del campo geotérmico de Los Humeros, México, como se informa en la sección del Foro de este número.

Los otros dos artículos que incluimos en esta edición son parte de los trabajos técnicos preparados por personal de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG), de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), para la II Reunión Interna de Mejora Continua (II RIMC). Este es un evento interno que se realiza anualmente para discutir temas técnicos y administrativos con experiencias y propuestas que buscan mejorar la gestión de esa área de la CFE, que es la que se encarga de manejar todos los campos geotérmicos mexicanos en explotación así como de explorar y desarrollar nuevos campos y de diseñar y construir nuevas centrales geotermoeléctricas. Esta gerencia, por cierto, también es la encargada de explorar y desarrollar los recursos eólicos, solares y de otras nuevas fuentes alternas de energía para generar electricidad. La II RIMC se realizó en febrero de 2007 en Mexicali, y entre las 31 ponencias ahí presentadas rescatamos las dos que se publican en este número, que son los trabajos de Pedro Sánchez y colaboradores sobre símulación de pozos y el de Carlos Valdés y Héctor Pérez sobre el monitoreo sísmico en Los Azufres. En números posteriores habremos de publicar otros trabajos técnicos de interés.

La sección del Foro incluye también, como siempre, la columna de El Mundo de la Energía.

Me permito aprovechar estas líneas para felicitar a nuestro Director del Consejo Editorial, José Luis Quijano León, quien a partir de julio de este año se ha jubilado de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, después de 25 años de servicios en la misma. Él habrá de continuar involucrado en la geotermia, toda vez que continúa siendo el Presidente de la Asociación Geotérmica Mexicana, por lo que seguiremos contando con su experta colaboración en la revista.

Simulación numérica de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C.

A. García¹, J.I. Martínez¹, A.F. Hernández¹, M. Ceceñas¹, R. Ovando¹, E. Salaices¹, I. Canchola², O. Mora², S. Gutiérrez², C. Miranda², M. Hernández² y S. López²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Av. Reforma 113, Palmira, Cuernavaca, Mor. 62490 México. ²Comisión Federal de Electricidad, Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26.5, Mexicali, B.C. México. Correo: <u>aggarcia@iie.org.mx</u>

Resumen

Se presentan los resultados de la simulación de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C. (CGCP). La red está compuesta por dos redes paralelas de Alta y Baja Presión debido a que en el campo existe separación primaria y secundaria de vapor, excepto en Cerro Prieto Uno (CPU), donde sólo hay separación primaria de vapor. A su vez, la red de Alta Presión se dividió en dos partes: el Bloque Norte, formado por los Ramales 1 y 2 de Cerro Prieto Tres (CPT), el campo de Cerro Prieto Cuatro (CPC), los pozos de Cerro Prieto Dos (CPD) que envían vapor a la Interconexión CPD-CPT (Cerro Prieto Tres), y las Interconexiones B y C hacia CPU; y el Bloque Sur formado por los Ramales 1 y 2 de CPD y el resto de los pozos de CPU. Por su parte, la red de Baja Presión se subdividió en tres bloques: el Bloque 1 que incluye 16 pozos de CPC y el Ramal 2 de CPT; el Bloque 2 que incluye 17 pozos de CPC, el Ramal 1 de CPT y la Interconexión CPD-CPT, y el Bloque 3 que incluye 44 pozos de CPD. Se encontró que las diferencias relativas promedio de las presiones y flujos medidos y simulados son menores para la red de Alta Presión que para la red de Baja Presión. Para el Bloque Norte de la red de Alta Presión, la diferencia relativa promedio entre presiones medidas y simuladas de los pozos varía entre -3.8% y +6.6%, con valores medios de 1.2 a 4.3%, mientras que para los puntos de entrega-recepción de vapor en las plantas las diferencias entre presiones y gastos medidos y simulados son menores de 5.2% y 1%, respectivamente, y la calidad es mayor de 98.5%. Para el Bloque Sur de la red de Alta Presión, la diferencia relativa promedio entre presiones medidas y simuladas de los pozos varía entre -8.2% y +4.2%, con valores medios de -3.7 a 2.3%, mientras que para los puntos de entrega-recepción de vapor en las plantas las diferencias entre presiones y gastos medidos y simulados son menores de $\pm 6.4\%$ y $\pm 9.0\%$, respectivamente, y la calidad es mayor de 96.5\%. Para la red de Baja Presión, las diferencias relativas promedio son de 21.2% para el Bloque 1, y de 8.0% y -2.8% para los Bloques 2 y 3, si se consideran las válvulas de la Interconexión CPD-CPT Sur y del Ramal 1 de CPT al Ramal 2 de CPC totalmente cerradas. La simulación de diversos escenarios con el flujo de vapor de la Interconexión CPD-CPT Sur hacia el Ramal 1 de CPT y al Ramal 2 de CPD, y con ajustes de las presiones de llegada a las plantas, indican que las diferencias relativas entre presiones medidas y simuladas pueden alcanzar valores de -1.6% a +8.0%, mientras que las diferencias entre gastos medidos y simulados a la llegada de plantas son de -8-3% a +28.2%, en promedio, y la calidad del vapor es mayor de 96%.

Palabras Clave: Red de vaporductos, simulación numérica, modelo hidráulico, campo geotérmico, Cerro Prieto

Numerical simulation of steam pipelines in Cerro Prieto geothermal field, B.C.

Abstract

Results are presented of the numerical simulation of the steam-pipeline network in Cerro Prieto geothermal field. The network is composed of two parallel nets of High- and Low-Pressure pipelines, as both the primary and secondary separation of steam occurs in the field, except for the Cerro Prieto Uno (CPU) sector with only primary steam separation. The High-Pressure net was divided into two parts. The North Block is integrated by Branches 1 and 2 of Cerro Prieto Tres (CPT), Cerro Prieto Cuatro (CPC), the wells of Cerro Prieto Dos (CPD) that send steam to Interconnection CPD-CPT, and Interconnections B and C to CPU. The South Block is composed of CPD Branches 1 and 2 and the remaining CPU wells. The Low-Pressure net was divided into three blocks: Block 1 includes 16 wells of CPC and Branch 2 of CPT; Block 2 has 17 wells from CPC, Branch 1 of CPT, and Interconnection CPD-CPT; and Block 3 includes 44 wells from CPD. The relative average differences of the measured and simulated pressures and flows for the High-Pressure net are lower than those of the Low-Pressure net. The average relative difference between measured and simulated well pressures for the High-Pressure net in the North Block varies between -3.8% and +6.6%, with average values ranging from 1.2 to 4.3%. The differences between measured and simulated pressures and flows at the delivery-reception points are under 5.2% and 1%, respectively, and the quality is over 98.5%. The average relative difference between measured and simulated well pressures for the High-Pressure net in the South Block varies between -8.2% and +4.2%, with average values between -3.7 to 2.3%. The difference between measured and simulated pressures and flows at the delivery-reception points are below $\pm 6.4\%$ and $\pm 9.0\%$, respectively, with the quality above 96.5%. The average relative differences for the Low-Pressure net are 21.2% for Block 1, 8.0% for Block 2, and -2.8% for Block 3, if the valves of the Interconnection CPD-CPT South-and of Branch 1 of CPT to Branch 2 of CPC-are considered completely closed. Simulation of distinct scenarios with the steam flow of Interconnection CPD-CPT South to Branch 1 of CPT and to Branch 2 of CPD, adjusting the arriving pressure to the power units, indicates that relative differences between measured and simulated pressures can reach values from -1.6% to +8.0%. Differences between measured and simulated flows at the power-unit reception range from -8-3% to +28.2% in average and the steam quality is over than 96%.

Keywords: Steam-pipes net, numeric simulation, hydraulic model, geothermal field, Cerro Prieto.

1. Introducción

En un trabajo previo (Salaices *et al.*, 2006) se describió la primera parte de un estudio relativo a la creación de un modelo hidráulico de la red de vaporductos del CGCP. Dicho modelo fue desarrollado y completado recientemente y se efectuaron simulaciones de flujo de vapor que permitieron entender el comportamiento de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y pérdidas de calor a través de cada uno de los componentes del sistema relacionados con el transporte de vapor de los pozos productores a las 13 plantas generadoras de electricidad. El modelo permite, además, el análisis del impacto de cambios en las condiciones de operación, variaciones en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño, como la integración de nuevos pozos. Aunque el modelo no toma ninguna decisión sobre cómo operar la red o sus componentes, sus resultados permiten determinar qué medidas pueden tomarse para mejorar su operación.

En otro trabajo (García *et al.*, 2006a) se describió también el estado del arte sobre simulación de flujo en redes de vaporductos geotérmicos, el CGCP, la metodología empleada para recopilar, clasificar y documentar a detalle la información que define a la red del CGCP, el simulador *Pipephase* que se seleccionó para

efectuar las simulaciones de flujo en la red y se mencionó la existencia de algunos simuladores de flujo que pudieran aplicarse en estudios similares al presente caso.

En el presente trabajo se dan a conocer los resultados de la simulación efectuada con relación a las operaciones de transporte de vapor del día 17 de septiembre de 2005. Como se mencionó anteriormente, existen dos redes paralelas de transporte de vapor sin interconexión: Alta y Baja Presión, y para las condiciones operativas del 17/09/2005 la red de Alta Presión se dividió en dos partes: el Bloque Norte, formado por los Ramales 1 y 2 de CPT, el campo de CPC, los pozos de CPD que envían vapor a la Interconexión CPD-CPT y las Interconexiones B y C hacia CPU; y el Bloque Sur, formado por los Ramales 1 y 2 de CPU. Por su parte la red de Baja Presión se subdividió en 3 bloques: el Bloque 1 que incluye 16 pozos de CPC y el Ramal 2 de CPT; el Bloque 2 que incluye 17 pozos de CPC, el Ramal 1 de CPT y la Interconexión CPD-CPT; y el Bloque 3 que incluye 44 pozos de CPD.

Los resultados que se presentan en este trabajo se limitan por razones de espacio al Bloque Norte de la red de Alta Presión del CGCP. Más detalles sobre la red y los resultados obtenidos se encuentran en Salaices *et al.* (2006) y García *et al.* (2006a y 2006b).

Resultados y Discusión -Red de Alta Presión



Fig. 1. Diagrama de la red de Alta Presión del CGCP mostrando los bloques Norte y Sur

La Fig. 1 muestra un esquema de la red de Alta Presión y los Bloques Norte y Sur en que se dividió la red.

Esta división se hizo ya que ambos bloques se interconectan en el extremo sur de la Interconexión CPD-CPT únicamente a través de una tubería (*bypass*) de 16" de diámetro, la cual tiene una válvula de mariposa de 12" estrangulada a un 5% de apertura, por lo cual para la simulación se aproxima inicialmente como totalmente cerrada para separar el modelo en dos partes.

• Resultados - Bloque Norte de Alta Presión

La Fig. 2 muestra una comparación de las presiones medidas y simuladas para los pozos conectados al Ramal 1 de CPT. Los resultados concuerdan con los datos con una diferencia relativa promedio de 1.74%, con máximo de 4.8% y mínimo de -3.5%

La Fig. 3 muestra el perfil de presiones a lo largo de los Ramales 1 y 2 de CPT. Como se puede ver,

existen dos puntos donde los perfiles se cruzan y corresponden a las conexiones de estos ramales con las interconexiones CPD-CPT y la Interconexión B que va hacia CPU.

La Fig. 4 muestra la distribución de flujos en el Bloque Norte de la red de Alta Presión.

Conclusiones

5

Se ha desarrollado un modelo hidráulico de la red de vaporductos del CGCP el cual fue documentado en detalle de manera gráfica, tabular y numérica. El modelo incluye las cuatro áreas del campo y abarca 183 pozos, de los cuales 162 son pozos integrados. Se efectuaron simulaciones con datos operativos del 17 de septiembre de 2005, las cuales permitieron entender el comportamiento de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y pérdidas de calor a través de cada uno de los componentes del sistema relacionados con el transporte de vapor de los pozos productores a las 13 plantas generadoras.



El modelo permite, además, el análisis del impacto de cambios en las condiciones de operación, variaciones en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño, así como la integración de nuevos pozos. Aunque el modelo no toma ninguna decisión sobre cómo operar la red o sus componentes, sus

resultados permiten determinar qué medidas pueden tomarse para mejorar su operación y proporcionan al personal a cargo de su operación mayores elementos de información y toma de decisiones.



Fig. 4. Distribución de flujos en los principales ductos de CPT y CPC

En general, las diferencias relativas promedio de las presiones y flujos medidos y simulados son menores para la red de Alta Presión que para la red de Baja Presión. Para la primera, la diferencia relativa promedio entre presiones medidas y simuladas no exceden de $\pm 9\%$ y la calidad del vapor entregado a plantas tiene calidades de 97.5% o mayores, mientras que para la red de Baja Presión las diferencias relativas promedio pueden ser mayores de 21% para el Bloque 1, y de 8 y 2.8% en promedio para los Bloques 2 y 3, si se consideran las válvulas de la Interconexión CPD-CPT Sur y del Ramal 1 de CPT al Ramal 2 de CPC totalmente cerradas.

La simulación de diversos escenarios con el flujo de vapor de la Interconexión CPD-CPT Sur hacia el Ramal 1 de CPT y al Ramal 2 de CPD, permiten reducir estas diferencias a valores entre -1.6% y +8.0%, mientras que las diferencias entre gastos medidos y simulados a la llegada de plantas pueden ser de -8-3% a +28.2%, en promedio y la calidad del vapor es de 96% o mayor.

Referencias

García, A., J.I. Martínez, A.F. Hernández, M. Ceceñas, R. Ovando y E. Salaices (2006a). Desarrollo de un modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto. Informe Final, Clave IIE/11/12885/I 04/F/DC, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor. Inédito.

- García, A., J.I. Martínez, A.F. Hernández, M. Ceceñas, R. Ovando y E. Salaices (2006b). Numerical simulation of the Cerro Prieto steam pipeline network. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 30, pp. 19-23.
- Salaices, E., A. García, J.I. Martínez, R. Ovando, M. Ceceñas A.F. Hernández, I. Canchola, O. Mora, C. Miranda, M. Hernández, S. López, I. Murillo (2006). Modelo Hidráulico de la Red de Vaporductos del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. *Geotermia*, Vol. 20, No. 1, pp. 2-10.

Ensayos de polimerización y depósito de sílice, pruebas de radiotrazadores y simulación numérica en el campo geotérmico de Berlín, El Salvador, Centroamérica

Marlon R. Castro Fuentes¹, Dina López², Jaime A. Reyes López¹ y Jorge Ramírez Hernández¹

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. ²Ohio University. Athens, Ohio. Correos: <u>mcastrosv@yahoo.com</u>, <u>lopezd@ohio.edu</u>, <u>jaime@iing.mxl.uabc.mx</u>

Resumen

El campo geotérmico de Berlín, El Salvador, empezó a explotarse para generar electricidad en febrero de 1992. Desde entonces, el total de las aguas residuales producidas, que es de aproximadamente 350 kg/s, es inyectado al reservorio del mismo campo. La inyección es la única opción factible para este campo, pero la incrustación de sílice en el reservorio ha provocado la disminución de la capacidad de aceptación de los pozos inyectores. La temperatura promedio del agua que se inyecta en caliente es actualmente de 175° C con un pH promedio de 6.5. Con las nuevas condiciones impuestas por el proceso de generación a ciclo binario, las aguas residuales se inyectarán a una temperatura de 140° C con un pH de 5.75, con lo que se evitará la precipitación de sílice dentro del sistema de ciclo binario, del sistema de acarreo y en los pozos inyectores. La temperatura del reservorio a la cual se inyecta el agua, está entre los 200 y 280° C. Se realizó la simulación numérica del proceso de enfriamiento del agua de la zona de producción del reservorio equilibrada con el cuarzo, así como las mezclas de agua de invección con la de producción. Para ello se utilizaron los programas SOLVEQ y CHILLER. Los resultados muestran que la masa de cuarzo precipitado dentro del reservorio por unidad de masa reinvectada depende fuertemente de la concentración inicial de sílice del agua inyectada. La temperatura y fracción de mezcla no parecen causar ningún efecto si el reservorio está a una temperatura mayor que el agua reinvectada. Se presentan los resultados de las simulaciones del proceso de mezcla entre las aguas del reservorio y las inyectadas, tanto bajo las condiciones actuales como las futuras. Estos muestran que aunque el cambio en la temperatura del agua de invección bajara 35° C, la cantidad de cuarzo que precipitaría (considerando las futuras condiciones de inyección) no sería demasiado diferente de la masa de cuarzo que está precipitando con la temperatura de inyección actual. Se esperaría una diferencia máxima del 15% en el porcentaje de poros tapados. Sin embargo, considerando un radio de 10 m, las simulaciones muestran que después de diez años una gran proporción de la zona de absorción se taparía para todos los escenarios, y probablemente el pozo no sería muy útil, ya que su capacidad de aceptación disminuiría de un 43 a un 50%. Los resultados experimentales de polimerización y depósito de sílice, así como pruebas realizadas con radiotrazadores, permiten realizar el cálculo del tiempo de polimerización y precipitación, así como de la velocidad del agua reinvectada al reservorio. Esta información se utilizó para calcular el área o radio de influencia alrededor de los pozos que podría ser afectada por incrustación de sílice. Utilizando la mayor velocidad a la que se encontró que se mueve el agua de acuerdo con las pruebas de radiotrazadores, se obtuvo un radio de influencia máximo de 72 m. Sin embargo, sólo una porción muy pequeña del agua inyectada alcanza la velocidad más alta. Se calculó, por tanto, un radio más representativo, empleando la velocidad media del movimiento de agua entre los pozos, el cual resultó ser de 9 m. Así, la zona afectada podría tener un área con un radio que va desde unos centímetros hasta 9 m. La comparación de esos resultados con el modelado geoquímico, muestra que para el campo geotérmico de Berlín un área de incrustación por sílice de 10 m alrededor de los pozos provocaría una reducción de porosidad de un 4% a un 5% por año, o de aproximadamente un 30% en seis años. Si fuese más pequeño, el pozo se taponaría en un tiempo más corto, como lo que probablemente pasó en el pozo TR-1A en 1999. Estos resultados muestran que los experimentos de campo y los modelados geoquímicos pueden ayudar a predecir o evaluar la incrustación por sílice en los pozos de inyección y establecen una base para un modelado completo de flujo de aguas subterráneas, transporte de solutos y reacciones químicas de paso. Como la obstrucción de los poros parece ocurrir en las proximidades de los pozos, las interacciones hidráulicas pueden explicar la declinación abrupta en la capacidad de inyección de los pozos, como el TR-14, cuando entran en operación pozos cercanos.

Palabras clave: Berlín, El Salvador, geoquímica, sílice, radiotrazadores, modelado.

Polymerization and silica deposition studies, and radiotracer tests and numerical modeling in the Berlín geothermal field, El Salvador, Central America

Abstract

Generation of electricity in the Berlín Geothermal Field in eastern El Salvador started in February 1992. All residual waters (~350 kg/s) produced during the process have been injected in this field, the only feasible field option. However silica scaling problems in the reservoir decrease the capacity of the wells to absorb water. Presently, the temperature of the injected waters in the hottest zone is 175° C and the average pH is 6.5. The new binary cycle unit that will generate electrical energy from the steam-separated waters of the Berlín geothermal field will produce residual waters with temperatures of 140° C and a pH of 5.75. Precipitation of silica minerals will be avoided in the superficial piping system and the injection wells. The reservoir temperature at the injection zone ranges from 280° C to 200° C. Modeling cooling of the hot, reservoir waters in equilibrium with quartz and mixing with injection waters was done using the programs SOLVEQ and CHILLER. Results show that the mass of quartz precipitated within the reservoir per unit mass of injected water strongly depends on the initial silica concentration of the injected water. The temperature and mixing fraction of the reservoir does not seem to have a deep effect if the reservoir is at a higher temperature. Modeling results are shown for the processes of mixing reservoir waters and injection waters under actual and future conditions. The simulation results show that even when the change in the injection brine temperature is around 35° C, the amount of quartz precipitated during future injection in the Berlín geothermal field will not differ too greatly from the mass of quartz precipitating under the present injection temperature. A maximum difference of 15% in the percentage of clogged pores is expected. However, for a damaged zone of 10 m, the simulations show that after 10 years a great proportion of the well will be clogged in all the scenarios modeled and that the well probably will not be very useful (43 to 50% decrease in porosity). Experimental results of silica polymerization and deposition and radiotracer tests allow the calculation of polymerization and precipitation times and groundwater velocities. The information is used to calculate the area around the wells likely to be affected by silica scaling. Using the fastest velocity found in the tracer tests, a maximum radius of 72 m away from the well is found. However, only a very small fraction of the water reaches the highest velocity. More representative of the damaged zone is the radius calculated with the mean velocities for water movement between wells. Considering the fastest mean velocity, a radius of 9 m is found. The damaged zone could have an area ranging from a few centimeters up to 9 m. Comparison of these results with geochemical modeling shows that for Berlín geothermal field, an area for silica scaling around the wells of 10 m could produce 4-5% pore reduction per year or about 30% in 6 years. If the radius is smaller, the well will clog in a shorter time, as probably happened in well TR-1A in 1999. The results show that field experiments and geochemical modeling can help to predict and assess silica scaling in geothermal injection wells, and set the basis for complete groundwater flow, solute transport, and reaction modeling. As the clogging of pores seems to happen close to the wells, hydraulic effects are proposed to explain the abrupt response of nearby wells (for example well TR-14) when injection starts in a new well.

Keywords: Berlín, El Salvador, geochemistry, silica, radiotracers, modeling.

1. Introducción

En El Salvador, Centroamérica, la energía geotérmica es uno de los pocos recursos energéticos nacionales disponibles para la generación de electricidad, alcanzando el 21% del total generada en el país. Esto coloca al país como el que satisface la mayor proporción de su demanda de energía eléctrica a partir de sus recursos geotérmicos. Uno de los dos campos geotérmicos más importantes en El Salvador es el de Berlín (Figura 1) que empezó su operación en 1992 con una unidad turbogeneradora a contrapresión de 5 MW. En 1995 se incorporó otra similar y en 1999 estas dos unidades se reemplazaron por dos unidades turbogeneradoras a condensación de 28.12 MW cada una, las cuales están en operación a la fecha. Por lo tanto, el campo tiene actualmente una capacidad instalada de 56.24 MW.



Una característica muy importante en la operación del campo de Berlín es que el 100% del agua residual generada (aproximadamente 350 kg/s) se inyecta nuevamente al reservorio. Uno de los problemas principales de la inyección es el alto contenido de sílice en las aguas geotérmicas residuales que pueden precipitar. Esta precipitación de sílice no ocurre dentro del sistema de acarreo superficial, pero sí dentro del reservorio debido a la dilatación de la inducción o tiempo de la polimerización de la sílice para la temperatura de inyección (175° C).

En 2004 se inició el proyecto Ciclo Binario en el campo, mediante el cual se aprovechará el calor residual contenido en el agua separada (de 180° C) para generar 9.2 MW de energía eléctrica adicional con un caudal

El proceso de incrustación por sílice en el reservorio puede entenderse con la simulación de la inyección bajo diferentes escenarios de operación del campo geotérmico y en condiciones actuales y futuras. Los programas usados para estas simulaciones son SOLVEQ (Reed y Spycher, 2001) y CHILLER (Reed y Spycher, 2000). Otros estudios que pueden aportar información adicional para entender el proceso de la incrustación por sílice son: pruebas de radiotrazadores (Matus, 2003; Matus *et al.*, 2000), los ensayos de polimerización y deposición de sílice (Molina *et al.*, 2005) y los estudios geoquímicos sobre incrustación de sílice (GENZL, 1995). Esta información, aunada a la simulación geoquímica, podría permitir estimar la vida útil de los pozos inyectores, el mejor manejo de la inyección, el volumen afectado del reservorio, proponer "limpiezas" en los pozos y con ello extender la explotación del reservorio.

Así, el objeto de este trabajo es mostrar cómo la interpretación adecuada de los ensayos de campo y la simulación geoquímica pueden llevar a una mejor comprensión del sistema geotérmico en el campo de Berlín, y cuya experiencia metodológica puede extrapolarse a otros campos geotérmicas con diferentes escenarios geológicos.

Escenario geológico

El campo de Berlín se localiza al oriente de El Salvador, en la falda N-NO del volcán Tecapa. La cadena volcánica en esta región se relaciona a la subducción entre las placas de Cocos y del Caribe (Molnar y Sykes, 1969). Otro rasgo tectónico importante del área es el límite entre las placas del Caribe y Norteamericana cercana a Guatemala, ya que éste define el sistema de fallas Motagua-Polochic. Paralelamente a la costa del Pacífico centroamericano, desde Guatemala a Nicaragua, se ha formado un graben que cruza El Salvador del Oeste al Este (Molnar y Sykes, 1969). La cadena volcánica sigue el margen sur de este graben. La Figura 1 muestra la situación del Campo Geotérmico de Berlín en El Salvador y Centroamérica y las principales fallas del área.

Según D'Amore y Tenorio (1999) el flujo de los fluidos se inicia en el sur del campo entrando al área de explotación alrededor del pozo TR-5 (Figura 2) con circulación hacia el norte, liberando calor ya sea por conducción y/o ebullición. Las rocas encontradas en el área del campo geotérmico son principalmente flujos de lava andesítica intercalada con capas de toba silícica de espesor mayor hacia la parte central del campo (1883 a 1943 m) y menor cerca de la superficie (Figura 2). Los minerales de alteración son principalmente cuarzo, calcita, clorita y penninita, wairakita, epidota, illita, albita y óxidos férricos (CEL, 1999).

El campo presenta un típico sistema geotérmico de tipo hidrotermal compuesto por una fuente de calor capaz de calentar a los fluidos contenidos en las rocas, un reservorio donde se pueden almacenar esos fluidos calientes, una capa sello capaz de aislar el reservorio de la superficie y una zona de recarga. Así, esquemáticamente presenta una zona productora central (Zona B) con temperatura alta (entre 280 y 300° C) y permeabilidad buena, una área más fría al Noreste (Zona A de inyección) de temperaturas menores (entre 220 y 250° C) y permeabilidad más baja, y una zona Sur bajo exploración que es la posible expansión del campo (Zonas C, D) con temperaturas posibles de 255° C (Figura 3). La porosidad media del reservorio se ha





Fig. 2. Representación esquemática de la distribución litológica del Campo Geotérmico de Berlín. Adaptada de CEL (1999).



Fig. 3. Mapa de distribución de temperaturas del Campo Geotérmico de Berlín (LaGeo, 2004)

2. Ensayos de campo y proceso de simulación numérica

Comportamiento de pozos inyectores y geoquímica

Inicialmente el suministro de vapor para las unidades turbogeneradoras a contrapresión provino de los pozos TR-2 y TR-9 y la inyección en caliente se dispuso en los pozos TR-8 y TR-14. Actualmente, el vapor adicional para la operación de las unidades turbogeneradoras a condensación se extrae de los pozos: TR-4, TR-4B, TR-4C, TR-5, TR-5A, TR-5B y TR-5C. La totalidad de aguas residuales en caliente se reinyectan en los pozos: TR-1A, TR-1B, TR-1C, TR-3, TR-4A, TR-8A, TR-10, TR-11ST, TR12 y TR-12A. Las aguas residuales frías (producto de las purgas de los sistemas de separación agua-vapor) se inyectan en los pozos TR-7 y TR-11A.



Fig. 4. Historial de la capacidad de inyección de agua geotérmica de algunos pozos reinyectores del Campo Geotérmico de Berlín

intervengan interacciones hidráulicas.

La Figura 4 muestra el historial de los pozos inyectores TR-1A, TR-11ST, TR-8 y TR-14. Se observa que después del inicio del pozo TR-1A la capacidad de inyección de agua del pozo TR-14 disminuyó, desde un promedio de 42 kg/s hasta un promedio de 10 kg/s, durante un lapso de tiempo de 1.25 años. Nótese que el pozo TR-14 mostró una capacidad de inyección muy estable durante un periodo de cuatro años, antes de que entrara en operación el pozo TR-1A.

En la Figura 5 se grafica el comportamiento de los índices de saturación de sílice (escala natural) contra la temperatura, para el pozo TR-11ST. Este comportamiento sugiere que la sílice no precipita a las condiciones de cabezal ni dentro de la tubería del pozo, pero sí probablemente en zonas de invección del reservorio. Así, es muy probable que la precipitación de sílice no sea la única causa de la disminución de capacidad de inyección de agua de los otros pozos inyectores y que posiblemente también

Polimerización e incrustación de la sílice. Movimiento del agua en el reservorio

En Berlín, el agua separada está supersaturada de sílice, aunque su precipitación no ocurre inmediatamente. Varios autores han modelado los procesos de polimerización y precipitación de sílice en medios porosos (Malate y O'Sullivan, 1988; Mroczek *et al.*, 2000; entre otros). Sin embargo, el problema de polimerización y deposición de sílice en los medios fracturados es probablemente más complejo. El periodo de tiempo antes de que la sílice comience a polimerizarse se denomina tiempo de inducción y para una temperatura dada disminuye con la sobresaturación.

El problema de deposición de sílice dentro de los pozos inyectores involucra varios pasos:

1. Durante el rápido enfriamiento en los sistemas de separación agua-vapor, la conducción por el sistema de acarreo superficial, el paso por el pozo inyector y finalmente en el reservorio, no hay precipitación porque el tiempo de inducción de la polimerización aún no ha terminado.

2. En el reservorio, el agua viaja una corta distancia antes de que la sílice empiece a precipitarse. La distancia recorrida depende de la velocidad del agua en el reservorio y del tiempo de la inducción, después de iniciado el viaje a lo largo del sistema de acarreo.

3. El fluido se mueve y la sílice precipita hasta que se alcanza la saturación con respecto a la solubilidad de la fase mineral correspondiente (cuarzo en el caso de Berlín). Se puede utilizar el tiempo necesario para precipitar y alcanzar la saturación, así como datos sobre la velocidad del agua dentro del reservorio, para estimar la distancia recorrida durante esta travesía. La



Fig. 5. Índices de saturación de la sílice amorfa del año 2003 para el pozo TR-11ST del campo geotérmico de Berlín (Castro et al., 2005).

distancia total o radio del reservorio afectado por la incrustación de la sílice estarán dados por la suma de la distancia encontrada en el numeral 2 más la distancia encontrada en el numeral 3.

4. La disminución en la porosidad respecto al tiempo para el área afectada puede encontrarse si se conoce la masa y el volumen de sílice precipitada por unidad de masa de fluido reinyectado.

Estudios de radiotrazadores

Nueve pruebas del radiotrazadores se han llevado a cabo en el campo de Berlín, con éxito variable. De estas pruebas se puede obtener el tiempo de viaje de los fluidos entre varios pozos (Matus, 2003; Matus *et al.*, 2000). La primera de las pruebas se llevó a cabo en mayo de 2000 con la inyección de I-131 (1.96 Ci) en el pozo TR-12A. Un ejemplo de la recuperación o curvas de detección se presenta en Figura 6, en la cual pueden obtenerse los diferentes tiempos de llegada (por ejemplo: más rápidos, finales y concentración máxima del trazador). En la otra prueba realizada en marzo de 2003 se inyectó I-125 (0.9296 Ci) en el pozo TR-4A (Matus, 2003). El trazador se recuperó sólo en el pozo TR-5A. La Tabla 1 muestra los diferentes tiempos de llegada de esta prueba y también los resultados para otros pozos.

Las distancias horizontales entre los diferentes pozos involucrados en las pruebas de trazadores exitosas, así como los tiempos de llegada de los radiotrazadores pueden usarse para calcular la velocidad máxima, mínima y promedio del agua en el reservorio (Tabla 1). Nótese que la velocidad media para la pareja de pozos TR-12A - TR-4C es igual a 2.2 m/min o $6.1E^{-4}$ m/s, que está dentro del intervalo de valores reportados por Montalvo *et al.* (2000).

Pozos	D (m)	Ti (días)	Tf (días)	Tmax (días)	Velocidad máxima (m/h)	Velocidad mínima (m/h)	Velocidad media (m/h)
TR12A-TR9	306.0	11	85	29	1.2	0.2	0.4
TR12A-TR4C	419.5	1	88	8	17.5	0.2	2.2
TR12A-TR5A	1710.5	15	92	82	4.8	0.8	0.9
TR12A-TR5B	800.6	3	93	28	11.1	0.4	1.2
TR4A-TR5A	404.9	7	58	24	2.4	0.3	0.7

D = Distancia, Ti = Primer tiempo de llegada, Tf = Tiempo final de llegada, Tmax = tiempo de llegada para la máxima concentración (Matus *et al.*, 2000 y Matus, 2003).

Tabla 1. Resultados de las pruebas de radiotrazadores para los pozos del Campo Geotérmico de Berlín.



Fig. 6. Curva del avance de la prueba de radiotrazadores en el pozo TR-5B. El radiotrazador fue inyectado en el pozo TR-12A el 16 de mayo de 2000 (Matus et al., 2000).

Experimentos de polimerización y deposición de la sílice

Se realizaron algunos experimentos de polimerización y deposición en el campo geotérmico de Berlín (Molina et al., 2005; SKM, 2004). En estos experimentos el agua caliente separada de los pozos TR-4 y TR-5 se envió a unos intercambiadores de calor para simular el paso del fluido por una planta de generación a ciclo binario. Posteriormente, el agua geotérmica enfriada se introdujo a un tanque de polimerización que simuló el tiempo de residencia del fluido en el sistema de acarreo superficial y en las tuberías del pozo. El tiempo de residencia se estimó en 60 minutos para una velocidad de flujo de 3 m/s. Se tomaron varios "puntos de muestreo" para considerar diferentes

tiempos de residencia y realizar el análisis de sílice monomérica y total.

Después del paso por el tanque de polimerización, el fluido viajó a lo largo de un sistema de deposición de sílice (sistema de tubería tipo serpentín), el cual fue pesado para evaluar la masa de sílice precipitada en cada prueba. Se utilizó agua sin y con tratamiento químico y enfriada a diferentes temperaturas. El tratamiento con ácido clorhídrico, para reducir el pH y retardar el tiempo de inicio de la polimerización, se hizo antes de entrar a los intercambiadores de calor.

Los resultados muestran que el tiempo de polimerización depende de la temperatura y del tratamiento o control del pH (Figura 7). Por ejemplo, para el agua no tratada, al enfriarse por el intercambiador de calor a una temperatura alrededor de 165° C, el tiempo de polimerización es 120 minutos. Si esta misma agua es enfriada alrededor de los 100° C, la polimerización es instantánea (tiempo cero). Estos resultados son consistentes con el trabajo de Rothbaum y Rohde (1979) pudiendo predecirse el tiempo de polimerización más alto a la temperatura más alta. La temperatura del agua de inyección varía entre 185° C y 175° C en su

recorrido desde los sistemas de separación a los pozos, lo que da un promedio de 180° C. Así, extrapolando para el agua no tratada a 180° C en la Figura 7, se estima un tiempo de polimerización de 167 minutos.



SKM (2004) estima para diferentes tiempos de polimerización y deposición el tiempo necesario para reducir el índice de saturación de sílice a 1. Este es el tiempo necesario para que precipite la sílice y alcance el equilibrio a la temperatura que se encuentra el agua. El tiempo de precipitación se estima aproximadamente en 66 minutos para una temperatura de 100° C, aproximadamente 79 minutos para 120° C y 108 minutos para 140° C. Para las temperaturas más altas los gráficos no se completan porque el tiempo de precipitación más grande que se necesitaba fue de dos horas. Una extrapolación adecuada de estos tres valores permite inferir un tiempo de 163 minutos para una temperatura de inyección de 175° C.

Simulación de la precipitación por sílice (proceso de modelado)

La Figura 8 muestra un modelo conceptual en el que se representa el movimiento radial que tiene el agua geotérmica reinyectada al reservorio y los posible radios a los cuales la sílice podría estar precipitando. Los procesos físico-químicos que fueron simulados en este trabajo se presentan a continuación:

1. Reconstitución del agua del reservorio y agua de inyección. Se utilizó el programa SOLVEQ para calcular la composición del agua original a condiciones de reservorio a partir de las composiciones de agua y gases tomadas a condiciones de cabezal del pozo TR-9 (fecha 16/02/05), con una fracción de vapor en la descarga de 0.2504. La composición del agua del reservorio se calculó para una condición de temperatura de 290° C y

una presión de 120 bars. De una manera similar, la composición del agua de inyección se reconstituyó a 175° C a partir de las condiciones de muestreo en el cabezal del pozo TR-1A (fecha 08/02/05). En este caso, la fase gaseosa no está presente.



Fig. 8. Movimiento del agua geotérmica reinyectada al reservorio
A) Representación esquemática del radio de influencia de la incrustación de la sílice en un pozo inyector, B) Movimiento del agua con un intervalo de velocidades mínimas y máximas v C) Movimiento del agua a una velocidad promedio

2. Enfriamiento del agua en el reservorio. El agua reconstituida del reservorio en la zona de producción del pozo TR-9 fue enfriada de 290° C a 150° C en pasos de 10° C. Estas simulaciones se hicieron con y sin interacción entre el agua y los minerales de la roca. En ambos casos con fraccionamiento (o separación) de minerales después de asumir que cada paso de temperatura había pasado. Así, se usaron las opciones del CHILLER de intercambio de temperatura, interacción agua-roca y equilibrio de minerales.

3. Mezcla de aguas e incrustación de sílice. El agua de inyección reconstituida a una temperatura de 175° C (TR-1A) se mezcló con el agua reconstituida del reservorio (pozo TR-9). Esta mezcla se realizó adicionando diferentes proporciones de agua de reservorio a 1 kg de agua de inyección hasta un 10% de agua de inyección y usando la opción del CHILLER "Water Mix". Se utilizó la composición del agua de reservorio a las temperaturas de 250° C y 200° C porque los pozos inyectores están dentro de este intervalo de temperaturas. En estas simulaciones se consideró la opción con y sin interacción entre el agua y los minerales de la roca. En ambos casos con fraccionamiento (o separación) de minerales después de asumir que cada paso de temperatura había concluido.

Para simular las condiciones futuras de inyección se enfrió el agua del pozo TR-1A hasta una temperatura de 140° C y un pH de 5.75 (se agregó H_2SO_4 para reducir el pH desde 6.5). En este caso también se simuló la mezcla con aguas reconstituidas del reservorio repitiendo el mismo procedimiento en cuanto a proporciones y temperaturas de mezcla de la simulación anterior (para el agua a 175° C). En estas simulaciones sólo se consideró la interacción agua-roca, además del fraccionamiento de minerales. Para las simulaciones con interacción agua-roca se usó el arreglo mineral observado en la zona de producción del campo y que se incluye en la base de datos termodinámicos del CHILLER (albita, anhidrita, calcita, clinocloro, galena, hematita).

3. Resultados y discusión

Simulación numérica de la incrustación por sílice (enfriamiento del agua de reservorio y mezclas de aguas)

La Figura 9 muestra los resultados para el enfriamiento del agua de reservorio reconstituida a partir del pozo TR-9 con las condiciones mencionadas anteriormente (inciso 2 del apartado anterior). Al parecer no hay una diferencia significativa para el cuarzo precipitado en los casos con y sin interacción agua-roca. Nótese que la precipitación más alta de cuarzo ocurre durante el primer cambio de temperatura (290° C a 280° C) ya que el agua supersaturada de sílice se equilibra. Durante los pasos subsecuentes, el cuarzo precipita debido a la disminución de temperatura que produce una menor solubilidad de este mineral.



Fig. 9. Comportamiento de la sílice durante el enfriamiento del agua de reservorio de la zona del pozo TR-9. Izquierda: Sin interacción agua-roca, derecha: Con interacción agua-roca

La Figura 10 muestra los resultados de la simulación para la mezcla conforme a las condiciones mencionadas anteriormente. Los valores de la abscisa varían de 0.99 a 0.1 de fracción de masa de agua inyectada respecto a la del reservorio. Puede observarse en estos gráficos (10 C y 10 D) que la temperatura de la solución al final de cada paso es la misma para los casos sin y con interacción agua-mineral. Otros parámetros como la masa y volumen del cuarzo precipitado a cada paso, la concentración final de sílice en la solución y la masa de cuarzo precipitada por masa total de agua mezclada se comportan de manera semejante, mientras que sus

valores son también muy similares en ambas ejecuciones. La precipitación más alta de cuarzo ocurre rápidamente al primer paso de mezcla, cuando el agua inyectada se equilibra térmicamente y se mezcla con 0.01 kg de agua del reservorio; después, sólo cantidades pequeñas de cuarzo precipitan.



Fig. 10. Comportamiento de la sílice en la mezcla de aguas de inyección a 175° C con agua de reservorio a 250° C, asumiendo fraccionamiento de minerales. 10 A y 10 C: No interacción agua-roca, 10 B y 10 D): Interacción agua-roca.

Un resultado importante de estas simulaciones es que la masa total de cuarzo precipitada es casi constante y sólo depende de la concentración inicial y de la masa de agua inyectada. La masa total de cuarzo precipitada a partir de 1 kg de agua inyectada, es de 0.672 g sin interacción agua-roca y de 0.679 g con interacción agua-roca. Las simulaciones utilizando el agua del reservorio enfriada a 200° C son similares a las mostradas con 250° C.

En esos dos escenarios de mezcla, la razón de la precipitación inicial de cuarzo corresponde al reequilibrio de la sílice en el agua inyectada, la cual se encuentra supersaturada a la temperatura de inyección. La adición subsiguiente de agua de reservorio y el incremento en la temperatura únicamente genera precipitación debido al reequilibrio del agua caliente del reservorio y el agua más fría inyectada en cada nueva fracción de mezcla y reequilibrio de temperatura. Estas simulaciones muestran que la masa de agua inyectada, su concentración de sílice y la temperatura de inyección determinan la masa de cuarzo que puede precipitar y puede tapar los poros de la formación. La temperatura del reservorio y su composición tienen sólo un efecto menor si se asume un equilibrio químico del cuarzo en el agua original del reservorio.

Estimación del radio de influencia de la sílice

Los resultados de las simulaciones realizadas dan una visión importante del proceso de precipitación de sílice y su impacto en la capacidad de inyección. La precipitación estimada varió de 0.612 g a 0.672 g en la mezcla a 200 y 250° C sin considerar la fracción mezclada. Esto corresponde a un volumen de entre 0.231 y 0.254 cm³. Si el caudal promedio reinyectado al pozo TR-1A es 38.8 kg/s durante 6.3 años (Romero, 2005), con un espesor de la zona de absorción de 200 m y un diámetro de 0.22 m, se puede calcular el volumen de reservorio afectado por la precipitación. Este correspondería a un volumen en la zona de absorción del pozo de 7.6 m³ (Mayorga *et al.*, 2001).

Los tratamientos químicos realizados a los pozos de Berlín para restaurar la permeabilidad, sugieren que un radio de 5 a 15 m es probablemente una buena suposición del área afectada (Schlumberger Surenco, com. pers., 2000). Esta estimación se basa en el cono de depresión formado con un flujo de 32 l/s y en la cantidad de químico usado en el tratamiento.

Con esta información se puede estimar el volumen del reservorio alrededor del pozo para diferentes radios y la masa o volumen de cuarzo precipitado por año, el porcentaje del volumen (asumiendo diferentes radios) tapado por año y después de seis años de inyección (Tabla 2).

Fracción agua inyectada / agua de reservorio	Radio de absorción (m)	Volumen de zona de absorción (m ³)	Volumen precipitado por kg de agua reinyectada (cm ³)	Volumen total precipitado (m³/año)	% volumen taponado por año	% volumen taponado en 6 años
		Mezcla	en reservorio a 250	°C		
0.99	5	1563	0.231	283.1	18.1	108.6
0.99	10	6276	0.231	283.1	4.5	27.0
0.99	15	14130	0.231	283.1	2.0	12.0
0.10	5	1563	0.254	310.3	19.9	119.4
0.10	10	6276	0.254	310.3	4.9	29.4
0.10	15	14130	0.254	310.3	2.2	13.2
Mezcla en reservorio a 200° C						
0.99	5	1563	0.231	282.9	18.1	108.6
0.99	10	6276	0.231	282.9	4.5	27.0
0.99	15	14130	0.231	282.9	2.0	12.0
0.10	5	1563	0.234	286.8	18.4	110.4
0.10	10	6276	0.234	286.8	4.6	27.6
0.10	15	14130	0.234	286.8	2.0	12.0

Tabla 2. Efecto de precipitación del cuarzo en la porosidad del reservorio cercana al pozo para una inyección a 175° C

Así, un radio de 5 m parece improbable ya que después de seis años todos los poros deberían de estar completamente tapados y el agua no podría circular. Un radio entre 10 y 15 m parece ser probablemente el más adecuado, ya que la reducción en la porosidad por año podría estar entre 2% y 5%, que parece más consistente con la disminución en la capacidad de inyección observada en los pozos. Si se consideran distancias mayores a 15 m, resultaría una disminución relativamente pequeña siendo la capacidad de inyección prácticamente despreciable.

Esos resultados sugieren que la precipitación de sílice en los pozos ocurre en una región cercana. Si esto es verdad, la precipitación en un pozo no debe afectar la capacidad de inyección de agua en otro pozo, por la distancia entre ellos (cientos de metros), o cuando menos su impacto no debería observarse en un periodo corto en pozos cercanos. Con base en esta premisa se puede afirmar que la respuesta del pozo TR-14 a la inyección en el TR-1A no se debe a procesos de incrustación por sílice, por lo que deben investigarse los cambios en el régimen hidráulico del reservorio por el volumen adicional de agua reinyectado.

Simulación de condiciones futuras de inyección

Los resultados entre las simulaciones para las condiciones actuales y las futuras de inyección son cualitativamente similares. Al igual que las condiciones actuales, la precipitación más alta de cuarzo ocurre al primer paso, cuando el agua inyectada se reequilibra térmicamente y se mezcla con 0.01 kg de agua del reservorio. Después de esto, sólo cantidades muy pequeñas de cuarzo precipitan debido al enfriamiento del agua del reservorio que se está mezclando con el agua reinyectada.

Un resultado importante de estas simulaciones, ya mencionado anteriormente, es que la masa total de cuarzo precipitada sólo depende de la concentración inicial de sílice y la masa en el agua inyectada. La masa total de cuarzo formada durante el primer paso de mezcla es de 0.678 g y de 0.677 g para ambos casos. Luego de ese paso y con la subsiguiente adición de agua de reservorio, la masa total de cuarzo precipitada a partir de 1 kg de agua inyectada es de 0.788 g para 250° C y de 0.708 g para 200° C. Al igual que en los escenarios actuales, la razón es que la precipitación inicial corresponde al reequilibrio del agua reinyectada supersaturada de sílice, la cual precipita como cuarzo para lograr el reequilibrio a la temperatura de inyección.

Comparación de los escenarios actuales y futuros de inyección

Bajo las condiciones de mezcla a 250° C, la masa total de cuarzo precipitado se incrementa de 0.672 g (cuando la inyección se realiza a 175° C) a 0.788 g (cuando la inyección se efectúa a 140° C y a un pH de 5.75). El volumen total de cuarzo formado aumenta de 0.254 cm³ a 0.297 cm³. Esto equivale a un incremento del 14.7% en la masa precipitada. Para las condiciones de mezcla a 200° C hay un incremento del 12.3% de cuarzo entre las condiciones actuales y futuras.

Estos resultados indican que las condiciones futuras de operación tendrán un aumento promedio de incrustación por sílice entre el 15% y 12%. Considerando la misma información utilizada para las condiciones actuales del pozo TR-1A, se puede estimar el porcentaje de volumen de poros del reservorio afectado por año en el proceso de incrustación por sílice (Tabla 3).

El decremento en la capacidad de aceptación de la porción del reservorio donde se inyecta para un periodo de 15 años, considerando los escenarios de mezcla a 250 y 200° C, se muestra en las Figuras 11A y 11B. En la Figura 11A, para una fracción de agua de inyección del 99%, el porcentaje de poros taponados en un periodo de 10 años se incrementa desde 43%, si la temperatura de inyección es de 175° C, hasta 48% si la temperatura de inyección es de 140° C. Para las mismas condiciones, si la fracción de agua de inyección es 10%, el porcentaje de poros taponados cambia de 47% a 55%. De una manera similar, en Figura 11B para

una temperatura de reservorio de 200° C, 10 años de inyección y un porcentaje del 99% de agua de inyección, el cambio en el porcentaje de poros taponados es de 43% a 175° C y de 48% a 140° C, y considerando de manera semejante el 10% de agua de inyección, el cambio es de 44% a 50%, respectivamente.



Fig. 11. Porcentaje de porosidad obstruida debido al volumen de cuarzo precipitado en la mezcla de aguas reconstituida a inyección en condiciones actuales (175° C) y condiciones de inyección futura (140 °C y pH = 5.75) con agua de reservorio para un radio fuera de pozo de 10 m, con interacción agua-roca y fraccionamiento de minerales. Figura izquierda: Temperatura de reservorio de 250° C. Figura derecha: Temperatura de reservorio de 200° C.

Temperatura de mezcla de agua (° C)	Fracción agua inyectada / agua de reservorio	Radio de zona de absorción (m)	Volumen precipitado por kg de agua inyectada (cm ³) con inyección a 140° C y pH = 5.75	Volumen total precipitado (m³/año) con inyección a 140° C y pH = 5.75	% volumen taponado por año con inyección a 140° C y pH = 5.75	% volumen taponado por año con inyección a 175° C
		5	0.256	298.6	19.1	18.1
	0.99	10	0.256	298.6	4.8	4.5
250		15	0.256	298.6	2.1	2.0
200		5	0.297	347.1	22.2	19.9
	0.10	10	0.297	347.1	5.5	4.9
		15	0.297	347.1	2.5	2.2
	0.99	5	0.256	298.2	19.1	18.1
		10	0.256	298.2	4.8	4.5
200 -		15	0.256	298.2	2.1	2.0
	0.10	5	0.267	312.1	20.0	18.4
		10	0.267	312.1	5.0	4.6
		15	0.267	312.1	2.2	2.0

Tabla 3. Efecto de precipitación del cuarzo en la porosidad del reservorio cercano al pozo y comparación entre la inyección de agua a 14 ° C (con pH = 5.75) y 175° C

Estimación del radio de influencia de la sílice a partir de las pruebas de radiotrazadores

La distancia desde la zona de producción a los pozos TR-1A y TR-14 es de 3,200 m y 4,200 m, respectivamente, y para estas distancias se calculó el tiempo de viaje total del agua inyectada, obteniéndose un tiempo de viaje de 70 y 92 minutos, lo que da un promedio de 81 minutos. Este tiempo puede sustraerse de la polimerización o tiempo de la inducción para el agua a inyección (167 minutos, como se discutió antes) dando un tiempo de viaje dentro del reservorio de 86 minutos antes de que la sílice precipite.

Se usaron los datos de la Tabla 1 para calcular la distancia que viaja el agua dentro del reservorio durante el tiempo de la inducción y del proceso de precipitación de sílice. Se presentan dos escenarios. En el primero, se toma la velocidad máxima y mínima a la que viaja el agua (Figura 8B). El agua con velocidad mínima viaja una distancia r1 antes de que la sílice empiece a precipitar, el agua con velocidad máxima viaja una distancia r2 antes de que la precipitación de la sílice del agua con velocidad máxima. Debe notarse que sólo un fragmento muy pequeño del agua está precipitando sílice cuando alcanza la distancia r2. Esto significa que r1 y r3 dan los límites de los radios para el proceso de precipitación. En la Tabla 1, la velocidad mínima es 0.2 m/h y la máxima de 17.5 m/h. Con estos valores, r1 es igual a 0.3 m, r2 sería igual a 25 m, y r3 es igual a 72 m. Para estos cálculos se usó un tiempo de precipitación de 163 minutos.

El segundo escenario considera sólo las velocidades medias (la mayoría del fluido debe estar moviéndose con esa velocidad). En este caso (Figura 8C), el rm1 representa la distancia recorrida por el agua en el reservorio antes de empezar a precipitar y rm2 - rm1 es la distancia que viajó durante el proceso de precipitación. Nótese que los diferentes caminos a los pozos en la Tabla 1 tienen diferentes velocidades medias. Si se toma una velocidad mínima promedio de 0.4 m/h, el rm1 tiene un valor de 0.6 m y el rm2 un valor de 1.7 m. Para una velocidad promedio máxima de 2.2 m/h, el rm1 es igual a 3.1 m y el rm2 es igual a 9.0 m.

En el primer escenario, las pocas moléculas que viajan a las velocidades más rápidas no es probable que precipiten a distancias mayores a los 72 m. Sin embargo, el segundo escenario probablemente representa mejor la conducta promedio de los procesos de incrustación. Según el segundo escenario, el área más afectada por la incrustación de sílice empieza a menos de 1 m del pozo pero no se extiende más allá de 9 m. En la sección de modelado quedó demostrado que la disminución de la aceptación de agua observada en los pozos de inyección después de unos años, así como la disminución de la permeabilidad y porosidad, sólo puede explicarse si la precipitación de sílice ocurre a distancias menores de 10 a 15 m (Tablas 2 y 3). Por otra parte, si el área afectada tiene un radio mayor, la reducción en la porosidad debe ser baja y los pozos deben continuar aceptando agua. Estos resultados son consistentes con los resultados de los modelados químicos, como era de esperar.

Validación del modelado

Aunque aún no se tienen datos para validar los resultados de la modelación para el agua de inyección a 140° C, se puede extrapolar esta validación a partir de la conducta histórica de la inyección a 175° C. Para esto se utilizó el comportamiento de la masa inyectada en los pozos TR-8 y TR-14, durante un periodo de dos años, del 01/01/97 al 02/01/99. Este periodo se consideró apropiado para este estudio de modelado debido a que es un intervalo de tiempo caracterizado por una generación estable en el campo geotérmico.

En la Figura 12 se presenta la masa promedio inyectada por segundo y por mes para el intervalo de tiempo indicado así como los ajustes de las tendencias lineales para estos datos. La pendiente de las tendencias lineales proporciona la disminución de la masa inyectada por unidad de tiempo. Los valores de las dos pendientes para los pozos TR-8 y TR-14 son -0.103 y -0.0453 kg/s/mes, respectivamente. Considerando el

flujo inicial de inyección durante este intervalo para los dos pozos (53.3 kg/s para el TR-8 y 42.2 kg/s para el TR-14), la disminución de la tasa de inyección es de 2.32% y 1.3%, respectivamente. El primer valor cae en el intervalo del porcentaje estimado del volumen taponado por año para radios entre 10 y 15 m (valores entre 2.0 y 4.9%, Tabla 3). El segundo valor (1.3%) corresponde a un radio ligeramente más grande de 15 m.



Fig. 12. Comportamiento de la capacidad de inyección de los pozos TR-8 y TR-14 en el periodo del 01/01/97 al 02/01/99

4. Conclusiones

Los resultados experimentales de polimerización y depósito de sílice, así como las pruebas realizadas con radiotrazadores, permiten realizar el cálculo del tiempo de polimerización y precipitación, así como de la velocidad del agua inyectada al reservorio.

Esta información se utilizó para calcular el área o radio de influencia alrededor de los pozos que podría ser afectada por incrustación de sílice. Utilizando la mayor velocidad a la que se encontró que se mueve el agua de acuerdo con las pruebas de radiotrazadores, se obtuvo un radio de influencia máximo de 72 m. Sin embargo, sólo una porción muy pequeña del agua invectada alcanza la velocidad más alta. Se calculó, por tanto, un radio más representativo, empleando la velocidad media del movimiento de agua entre los pozos, el cual resultó ser de 9 m. Así, la zona

afectada podría tener un área con un radio que va desde unos centímetros hasta 9 m.

La comparación de esos resultados con el modelado geoquímico, muestra que para el campo geotérmico de Berlín un área de incrustación por sílice de 10 m alrededor de los pozos provocaría una reducción de porosidad de un 4% a un 5% por año, o de aproximadamente un 30% en seis años. Si fuese más pequeño, el pozo se taponaría en un tiempo más corto, como probablemente ocurrió en el pozo TR-1A en 1999.

Los resultados demuestran que los experimentos de campo y los modelados geoquímicos pueden ayudar a predecir o evaluar la incrustación por sílice en los pozos de inyección y establecen una base para un modelado completo de flujo de aguas subterráneas, transporte de solutos y reacciones químicas de paso. Como la obstrucción de los poros parece ocurrir en las proximidades de los pozos, las interacciones hidráulicas pueden explicar la declinación abrupta en la capacidad de inyección de los pozos, como el TR-14, cuando entran en operación pozos cercanos.

Este trabajo ha demostrado la importancia de integrar resultados experimentales (pruebas con radiotrazadores, pruebas de campo de precipitación de sílice, mediciones de caudales inyectados en pozos) con el modelado geoquímico, para obtener una comprensión más profunda de la incrustación de sílice en campos geotérmicos y para predecir su comportamiento en esquemas futuros de explotación.

Referencias

- Castro, M., D. López, J.A. Reyes, J. Ramírez H., O. Lázaro M. y F.E. Montalvo (2005). Simulación de la incrustación por sílice en la zona de reinyección del Campo Geotérmico de Berlín, El Salvador, C.A. *Memorias de la reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana*, Noviembre de 2005, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- CEL (1999). Informe Geológico Final del Pozo Direccional TR-1A. Informe interno de la División de Generación Geotérmica, Agosto de 1999, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, C.A. Inédito.
- D'Amore, F., and J. Tenorio (1999). Chemical and physical reservoir parameters at initial conditions in Berlin geothermal field, El Salvador: A first assessment. *Geothermics*, v. 28, pp. 45-73.
- GENZL (1995). Prestación de servicios para desarrollar estudios geocientíficos complementarios en el Campo Geotérmicos Berlín. Contrato CEL-2301. Reporte interno. El Salvador, C.A. Inédito.
- LaGeo, S.A. de C.V (2004). Reporte de manejo del Campo Geotérmico de Berlín. Reporte interno. Julio de 2004. El Salvador C.A. Inédito.
- Malate, R.C.M., and M.J. O'Sullivan (1988). Mathematical modeling of silica deposition. *Proc.* 10th New Zealand Geothermal Workshop, p. 257-262.
- Matus, A. (2003). Radiotracer test in the well TR-4A Berlin Geothermal Field El Salvador. LaGeo S.A. de C.V., Internal Report, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador. Inédito.
- Matus, A., W. Guevara, y F. Montalvo (2000). Novena prueba de radiotrazador. Campo Geotérmico de Berlín. LaGeo S.A. de C.V., Reporte interno, Santa Tecla, El Salvador. Inédito.
- Mayorga, H., L. Barrios y M. Castro (2001). Programa de estimulación química TR-1A. GESAL, S.A. de C.V., Reporte interno, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, C.A. Inédito.
- Molina Padilla, S.R., P. Barnett, M. Castro, E. Guerra, and J.L. Henríquez (2005). Silica polimerization and deposition trials at the Berlin Geothermal Field, El Salvador. *Proc. World Geothermal Congress* 2005, Antalya, Turkey, April 2005.
- Molnar, P., and L.R. Sykes (1969). Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity. *Geol. Society of America Bulletin*, 80, pp. 1639-1684.
- Montalvo, F., A. Matus, and W. Guevara (2000). Ninth Radiotracer Test in Berlin Geothermal Field. Geotérmica Salvadoreña, S.A. de C.V., Internal Report, Santa Tecla, El Salvador. Inédito.
- Mroczek, E. K., S.P. White, and D.J. Graham (2000). Deposition of amorphous silica in porous packed bedspredicting the lifetime of reinjection aquifers. *Geothermics*, v. 29, pp. 737-757.
- Reed, M.H., and N.F. Spycher (2000). User guide for CHILLER, a program for computing water and rock reaction, boiling, mixing and other reaction processes in aqueous and mineral and gas systems. Department of Geological Sciences, University of Oregon.

- Reed, M.H., and N.F. Spycher (2001). User guide SOLVEQ, a program for computing aqueous and mineral and gas equilibrium. Department of Geological Sciences, University of Oregon.
- Romero, R. (2005) Historial del Campo Geotérmico de Berlín. LaGeo, S. A. de C. V., Reporte interno, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, C.A. Inédito.
- Rothbaum. H.P., and A.G. Rohde (1979). Kinetics of silica polymerization and deposition from dilute solutions between 5 and 180° C. J. Colloid and Interface Sci., v. 71, No. 3, p. 533-559.
- SIGET (2000). Contrato de concesión para la explotación geotérmica de: Central Geotérmica de Ahuachapán y Berlín por la Sociedad Geotérmica Salvadoreña. Gerencia de Electricidad, Depto. de Normas Técnicas y Concesiones. Documento interno. Marzo de 2000, San Salvador, El Salvador, C.A.
- SKM (Sinclair Knight Mertz) (2004). Silica polymerization and deposition trials at TR4/5 and TR2/9 brine lines. In: Berlin Geothermal Field Binary Cycle Power Plant Project. Revision 3. Report presented to LaGeo S.A. de C.V. Internal Report, Santa Tecla, El Salvador. Inédito.

Modelación de la subsidencia en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Olga Sarychikhina¹, Ewa Glowacka¹, Miguel Guzmán² y Francisco Suárez³

¹Departamento de Sismología, CICESE, ²Facultad de Ingeniería, UABC, ³Departamento de Geología, CICESE. Correo: <u>osarytch@cicese.mx</u>

Resumen

En estudios anteriores se demostró que los desplazamientos del terreno en el campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se deben al desarrollo de su explotación y al movimiento tectónico. En el presente trabajo usamos deformaciones horizontales y el modelo sismotectónico (Bennett *et al.*, 1996) de la región, junto con datos de las nivelaciones de precisión realizadas por la Comisión Federal de Electricidad (Lira y Arellano, 1997) y el CICESE (Glowacka *et al.*, 1999) para la modelación de la parte tectónica y antropogénica de la subsidencia. Usando los resultados de la modelación e información sobre los volúmenes de extracción y reinyección, se evalúa el volumen de la recarga regional.

Palabras clave: Cerro Prieto, desplazamientos de terreno, modelación.

Subsidence modeling in the Cerro Prieto, BC, geothermal field

Abstract

Studies have shown that ground displacements in the Cerro Prieto geothermal field are due to fluid exploitation and tectonic movements. In the present work we use horizontal deformation data and the seismotectonic model (Bennett *et al.*, 1996) of the region together with precise leveling measurements made by the Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Lira y Arellano, 1997) and the CICESE (Glowacka *et al.*, 1999) to model tectonic and anthropogenic subsidence. From the modeling results and the extraction and reinjection volumes, the regional recharge volume is evaluated.

Keywords: Cerro Prieto, ground displacements, modeling.

1. Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se localiza en el norte de la península de Baja California, en el valle de Mexicali, Baja California, México, y dentro de la porción sur de la provincia geológica de la cuenca de Salton, considerada como una de las provincias geológicas con mayores recursos geotérmicos en el mundo (Fig. 1).

El campo es operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), quien empezó a explotarlo a partir de 1973 para producir electricidad aprovechando el recurso geotérmico. En 1989 empezó la reinyección de las aguas residuales de la extracción, y actualmente alrededor del 20% del fluido extraído está siendo reinyectado.

El CGCP se localiza dentro de un área tectónicamente muy activa, en la frontera entre las placas del Pacífico y de Norteamérica, en una cuenca de tipo *pull-apart* delimitada por fallas transformantes del sistema San Andrés con movimiento relativo intraplacas de 4.9 cm/año (Bennett *et al.*, 1996). El CGCP se encuentra en una zona de extensión, entre las fallas Imperial y Cerro Prieto ambas con movimiento lateral derecho (Fig. 1a).



Es bien conocido y ampliamente documentado que las deformaciones del terreno pueden acompañar a la explotación de los campos geotérmicos (por ejemplo, Allis *et al.*, 1998; Glowacka *et al.*, 1999; Fialko and Simons, 2000). En la zona que engloba el CGCP, hasta los años 90 las deformaciones observadas se atribuían solamente al tectonismo regional. Actualmente, tras 30 años de extracción de fluidos, estudios de nivelación y monitoreo sísmico, se ha podido determinar que los desplazamientos del terreno en el CGCP se deben tanto al movimiento tectónico regional como a la explotación de los fluidos del yacimiento (Glowacka *et al.*, 1997; Glowacka *et al.*, 1999).

En el presente trabajo se modela la parte tectónica y antropogénica de la subsidencia y se evalúa el volumen de la recarga regional.

2. Datos

Se emplearon los datos de nivelación de precisión publicados en Glowacka *et al.* (1999). Dicha nivelación fue realizada por la CFE (Lira y Arellano, 1997) y el CICESE (Glowacka *et al.*, 1999) en el periodo de 1994 a 1997 en el área que engloba al CGCP. La nivelación incluye 95 puntos y el punto de referencia está ubicado en la Sierra Cucapá (Fig. 2). La tasa de subsidencia observada se presenta en la Figura 2.

La zona tiene dos centros de subsidencia con velocidades máximas de 12 y 9 cm/año, respectivamente. Cabe mencionar que la zona de máxima subsidencia (~12 cm/año) coincide con la zona del campo geotérmico. El segundo centro de subsidencia (~9 cm/año), situado entre el área de pozos y la Falla Imperial, probablemente puede estar relacionado con el área del acuífero de agua fría que es una fuente de la recarga para el yacimiento geotérmico bajo las condiciones de su explotación actual (Glowacka *et al.*, 1999).



Fig. 2. Subsidencia observada (1994 – 1997) en cm/año. Las cruces de color café son las bases de nivelación. P.F. es el punto fijo.

3. Modelación de la parte tectónica de la subsidencia

Se calculó la deformación vertical producida por el movimiento lateral derecho entre las placas de Norteamérica y del Pacífico. Las velocidades de desplazamiento de las placas a lo largo de las fallas Cerro Prieto e Imperial fueron estimadas por Bennett *et al.* (1996) mediante mediciones de posicionamiento global (GPS) (junio 1994 – marzo 1997) y son del orden de 4.2 cm/año y 3.5 cm/año, respectivamente. Las trazas de las fallas Imperial y Cerro Prieto, así como las posiciones de sus extremos, fueron determinadas usando observaciones de campo de González y otros (1998). Se asumió que las fallas son verticales con movimiento

transcurrente puro y se extienden desde la superficie hasta una profundidad de 15 km, ya que los sismos en la zona ocurren hasta aproximadamente esta profundidad.

La subsidencia se calculó empleando el programa Coulomb 2.0 (King *et al.*, 1994; Toda *et al.*, 1998). La tasa de subsidencia tectónica relativa al punto fijo se presenta en la Figura 3 en la que aparecen dos anomalías de subsidencia de forma elipsoidal, de orientación noreste–suroeste aproximadamente y perpendiculares a las fallas Imperial y Cerro Prieto. El máximo valor de subsidencia (0.45 cm/año) coincide con el área del CGCP. La anomalía en la parte noreste del área de estudio coincide con la zona definida anteriormente como zona de recarga. El orden de la subsidencia tectónica en el área de estudio concuerda con la subsidencia estimada usando otros métodos para algunas áreas cercanas a ésta (Contreras *et al.*, 2002; Johnson *et al.*, 1983).



Fig. 3. Tasa de subsidencia tectónica acumulada por año (cm/año).

De acuerdo con nuestros resultados, la subsidencia asociada a procesos tectónicos representa solamente 4% de la subsidencia total observada y ocurre, probablemente, durante los sismos.

4. Modelación de la parte antropogénica

La modelación de la parte antropogénica de subsidencia se realizó usando el modelo hidrológico del CGCP (Halfman *et al.*, 1984; Lippmann *et al.*, 1991), como información básica sobre el posicionamiento de los acuíferos. Se usaron los modelos matemáticos de fracturas rectangulares, tensionales, para modelar el efecto de compactación de acuíferos localizados en los estratos sedimentarios y limitados por fallas, así como los modelos de fracturas de cizalla para modelar discontinuidades en la forma de subsidencia. La modelación fue realizada mediante el método de prueba y error empleando el programa Coulomb 2.0.

El modelo resultante consiste de cinco acuíferos: dos acuíferos de agua fría: R.G. y r.ch., y tres acuíferos correspondientes a los reservorios geotérmicos: a, b1, y b2. La fractura de cizalla CImp representa el fenómeno de deslizamiento asísmico (*creep*) observado en el extremo sur de la Falla Imperial. Los parámetros del fractura CImp son: largo de ~3 km, extensión a profundidad de 0.2 a 1 km, 173° de azimut, 70° de echado hacia el oeste y 7 cm/año de deslizamiento normal. Los parámetros de las fracturas tensionales rectangulares del modelo final se presentan en la Tabla 1.

	Parámetros								
Fractura	Cent	Centro de fractura (m)			(m)			(grados)	
	X	У	z	р	c1	С	Azimut	Echado	
α	664032	3584530	1100	-0.05	3471	2019	140	1	
β1	666667	3586700	2100	-0.1	1099	2144	138	4	
β2	669000	3586000	2250	-0.12	737	2293	138	4	
r.ch.	673352	3590150	1500	-0.079	2907	2333	142	7	
R.G.	669057	3587291	996	-0.04	5806	6347	139	1	

Claves: p: Cierre de la fractura; c1: semilargo de la fractura; c: semiancho de la fractura.

Tabla 1. Parámetros de las fracturas tensionales rectangulares del modelo final obtenido para lamodelación de la subsidencia antropogénica

El error mínimo cuadrado (RMS) del modelo es de 0.7 cm/año. La proyección de las fracturas del modelo a la superficie se presenta en la Figura 4, mientras que la comparación entre la subsidencia antropogénica modelada y la subsidencia observada se presenta en la Figura 5. El residuo del modelo se muestra en la Figura 6.

5. Estimación de la recarga regional

Los valores calculados de cierre de las fracturas tensionales y sus dimensiones permiten calcular el cambio de volumen de los reservorios. Si comparamos este cambio con la tasa de extracción (o de la extracción menos la inyección), podemos evaluar el volumen de la recarga externa o regional en el CGCP.

Para los años de 1994 a 1997, la tasa de extracción promedio es de 1.05×10^8 ton/año, 18% de la cual (1.88 x 10^7 ton/año) ha sido reinyectada. El cambio de volumen producido por el cierre de fracturas del modelo compensa solamente ~10% de la reducción de volumen que debería de ocurrir por causa de la extracción. De este 10% solamente 3% se debe a la reducción del volumen de los reservorios del yacimiento y otro 7% a la reducción del volumen de los reservorios del yacimiento y otro 7% a la compensa por la entrada de agua del acuífero regional.

Agradecimientos



Fig. 4. Modelación de la subsidencia antropogénica. Proyección de las fracturas del modelo final a la superficie. FL es la Falla L, FH es la traza de la Falla H en la superficie, FHb es la intersección de la falla H con el techo del reservorio β.

Los resultados y conclusiones presentados en este trabajo son solamente de los autores y no necesariamente expresan el punto da vista de la CFE ni del CICESE. El proyecto es financiado parcialmente por el CONACyT y cuenta con el apoyo e intercambio de información de la CFE.

Referencias

- Allis, R.G., X. Zhan and A. Clotworthy (1998). Predicting Future Subsidence at Wairakei Field, New Zealand. *Geothermal Resources Council Trans.*, 22: pp. 43-47.
- Bennett, R.A., W. Rodi and R.E. Reilinger (1996). Global Positioning System Constrains on Fault Slip Rates in Southern California and Northern Baja, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B10), pp. 21943-21960.

Fractura	Cambio de volumen (m³)	
α	1.4 × 10 ⁶	
β1	1 × 10 ⁶	3.2 × 10 ⁶
β2	0.8 × 10 ⁶	
r.ch.	2.1 × 10 ⁶	9.1×10^{6}
R.G.	6 × 10 ⁶	- 0.1 ^ 10
Total	1.1 × 10 ⁷	

Tabla 2. Cambio de volumen producido por el cierre de las fracturas tensionales rectangulares del modelo final obtenido para la modelación de la subsidencia antropogénica. Contreras, J., A. Martin-Barajas and J.C. Herguera (2002). Subsidence and Extension Rates of Laguna Salada Basin, Northeastern Baja California, Mexico. *Eos Trans. AGU*, 83 (47), Fall Meet. Supl., Abstract T52C – 1223.

Fialko, Y. and M. Simons (2000). Deformation and seismicity in the Coso geothermal area, Inyo Country, California: Observation and modeling using satellite radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 195 (B9), pp. 21781-21793.

Glowacka E., H. Fabriol, L. Munguía, and J.J. González (1997). Seismicity and surface deformation around the Cerro Prieto Geothermal Field. *Rockbursts and Seismicity in mines*, ed. Gibowicz, Lasocki, pp. 397-401.



Fig. 5. Modelación de la subsidencia antropogénica. Comparación de la subsidencia observada (isolíneas negras) con la subsidencia modelada (isolíneas verdes)

Glowacka, E., J.J. Gonzalez and H. Fabriol (1999). Recent Vertical deformation in Mexicali Valley and its Relationship with Tectonics, Seismicity and Fluid Operation in the Cerro Prieto Geothermal Field. *Pure and Applied Geophysics*, 156, pp. 591-614.



Fig. 6. Modelación de la subsidencia antropogénica. Residuo del modelo final en cm/año.

- González, J.J., E. Glowacka, F. Suárez, G. Quiñónez, M. Guzmán, J.M. Castro, F. Riviera y M.G. Félix (1998). Movimiento reciente de la Falla Imperial, Mexicali, B.C. *Divulgare*, Ciencia para todos, Mexicali, B.C, 6 (22), pp. 4 -15.
- Halfman, S.E., M.J. Lippmann, R. Zelwer and J.H. Howard (1984). A geologic interpretation of the geothermal fluid movement in Cerro Prieto field, Baja California, Mexico. *Assoc. Pet. Geological Bulletin*, 68, pp. 18-30.
- Johnson, N.M., C.B. Officer, N.D. Opdyke, G.D. Woodard, P.K. Zeitler, and E.H. Lindsay (1983). Rates of late Cenozoic Tectonism in the Vallecito Fish Creek basin. *Geology*, 11, pp. 664 667.
- King, G.C.P., R.S. Stein, and J. Lin (1994). Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin* of the Seismological Society of America, 84 (3), pp. 935 953.
- Lippmann, M.J., A.H. Truesdell, A. Mañón and S.E. Halfman (1991). A review of the hydrogeologic-geochemical model for Cerro Prieto. *Geothermics*, 20, pp. 39-52.
- Lira, H., y J.F. Arellano (1997). Resultados de la nivelación de precisión realizada en 1997, en el campo geotérmico Cerro Prieto. Informe interno No. RE 07/97, CFE, México. Inédito.
- Toda, S., R.S. Stein, P.A. Reasenberg, and J.H. Dieterich (1998). Stress transferred by the Mw = 6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *Journal of Geophysical Research*, 103, pp. 24543-24565.

Estimación del flujo de calor entre el pozo y la formación a partir de registros de presión: simulación de pozos

P. Sánchez-Upton^{1,2}, E. Santoyo², M.H. Rodríguez-Rodríguez³

¹Comisión Federal de Electricidad, Alejandro Volta 655, Morelia 58290, Mich. México, ²Centro de Investigación en Energía, UNAM, México ³Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto. Correo: <u>pedro.sanchez@cfe.gob.mx</u>

Resumen

La transferencia de calor entre el pozo y la formación es un fenómeno intrínseco de estos sistemas a pesar de que los cementos utilizados para fijar las diferentes tuberías de revestimiento son excelentes aislantes térmicos. Por esta razón, en los estudios de simulación de pozos es imprescindible considerar el intercambio de calor a través de este sistema, principalmente cuando los gastos másicos de fluido son pequeños. No obstante, la mayoría de estos estudios se realizan frecuentemente suponiendo que el flujo de fluidos en el pozo es adiabático porque usualmente no se dispone de toda la información que requieren estos simuladores en relación con el flujo de calor. Asimismo, estos estudios están restringidos a considerar que el fluido geotérmico se comporta de manera similar a la del agua pura porque la caracterización química de los fluidos producidos tampoco está disponible. Atendiendo esta problemática, en el presente trabajo se investiga el efecto que tiene la transferencia de calor en los estudios de simulación de pozos y se desarrolla una nueva metodología que permite estimar el flujo de calor en estos sistemas a partir de registros de presión.

Palabras clave: Ecuación de estado, proceso adiabático, transferencia de calor, simulación de pozos, regresión no lineal.

Estimation of heat flow between well and formation from pressure logs: well simulation

Abstract

Heat transfer between the well and the formation is an intrinsic, systemic process. Even cements used to fix the casing are excellent thermal isolators. For this reason, in well-simulation studies it is imperative to take into account heat exchange throughout the system, especially where mass flows are small. However most studies are based on the assumption that fluid flows within the well are adiabatic, usually because of the unavailability of all of the data information the simulators require regarding heat flow. In addition these studies assume geothermal fluids behave in a way similar to pure water, as the exact chemical compositions of the fluids are unavailable. Remembering these problems, we'll look at the effects of heat transfer on well simulation studies and develop a new methodology to estimate the heat flow in these systems from pressure logs.

Keywords: Equation of state, adiabatic process, heat transfer, well simulation, nonlinear regression.

1. Introducción

La caracterización del sistema pozo-formación es una de las principales tareas que enfrentan las ingenierías de producción y de yacimientos. Desde el punto de vista de ambas disciplinas esta caracterización consiste en

conformar una descripción general del sistema basada en múltiples estudios independientes tales como pruebas de producción, pruebas transitorias de presión y temperatura y análisis químico de los fluidos producidos. También se realizan algunos otros estudios especiales con la finalidad de identificar las peculiaridades más trascendentes de los pozos, como son el punto donde los líquidos inicialmente "flashean" y la ubicación de los diferentes estratos productores. Como se sabe, toda esta información es vital para definir el ritmo de extracción de los pozos y estimar la capacidad de generación de energía eléctrica del yacimiento.

Los simuladores de pozos se utilizan como herramientas fundamentales para llevar a cabo esos estudios especiales, pero también para seleccionar el diseño tubular óptimo de nuevos pozos a partir de la caracterización de los primeros. La mayoría de los simuladores comerciales (p.e.: Wellsim, 1990) cuentan con una o varias correlaciones para estimar los gradientes de presión que se presentan durante el transporte de fluidos bifásicos, principalmente. En los códigos de estos simuladores también se implementan las ecuaciones de estado que intentan reproducir el comportamiento termodinámico de los fluidos geotérmicos. Igualmente, se implementan en estos códigos algunos métodos particulares para cuantificar el intercambio de calor entre el pozo y la formación. Como es de esperarse, todos estos componentes además de un conjunto de algoritmos matemáticos permiten resolver las ecuaciones de conservación de la mecánica de fluidos.

En general, los simuladores de pozos emplean la mayor parte de la información que se engloba en los estudios de caracterización de los pozos, que incluye: parámetros químicos y de producción, terminación de los pozos, distribuciones de temperatura y de parámetros petrofísicos en la formación, y tiempo de producción. Infortunadamente, no siempre se dispone de toda esta información. La información relacionada con la transferencia de calor entre el sistema pozo-formación y la relacionada con la caracterización química de los fluidos producidos son las que faltan con mayor frecuencia. Bajo esta restricción casi permanente, la simulación de pozos comúnmente se realiza suponiendo que el fluido se conduce a la superficie a través de un proceso adiabático.

Sin embargo, los resultados de la simulación de pozos pueden ser bastante diferentes cuando se asume que los fluidos se conducen hacia la superficie mediante un proceso adiabático. Por lo tanto, en este trabajo se presenta una nueva metodología que permite estimar el flujo de calor entre el sistema pozo-formación a través de registros de presión.

Antecedentes

La transferencia de calor es un fenómeno inexorable en el sistema pozo-formación a pesar de que los cementantes utilizados en el anclaje de las tuberías de revestimiento exhiben una reducida conductividad térmica que los hace excelentes aislantes térmicos. Los trabajos de cementación no son siempre exitosos, por lo que en ocasiones el flujo de calor a través del sistema puede ser mayor. Asimismo, el intercambio de calor puede incrementarse si los cementos sufren algún tipo de degradación. Por lo tanto, es deseable que todo trabajo de simulación de pozos deba tomar en cuenta el intercambio de calor a través de este sistema.

Sin embargo, la información relativa a la transferencia de calor requerida por los simuladores de pozos con frecuencia está incompleta, o bien no se encuentra disponible. De igual forma, tampoco la información relativa a la química de los fluidos lo está. Como es de esperarse, la falta de esta información influye en los resultados que se obtienen al aplicar los simuladores.

La calidad con que se determinan las diferentes variables utilizadas en los simuladores es relevante para obtener resultados realistas. Con respecto a esto es importante señalar que las mediciones que se realizan en el campo son intrínsecamente difíciles de registrar y con frecuencia carecen de la exactitud que se requiere en estos estudios. Por tanto, es frecuente encontrar inconsistencias en la información generada.

Como se sabe, el uso de los simuladores no garantiza la obtención de los resultados buscados. En general, los simuladores comerciales implementan ecuaciones de estado que intentan reproducir el comportamiento termodinámico de fluidos geotérmicos multicomponentes, las cuales tienen incertidumbres desconocidas. Asimismo, los simuladores utilizan una o varias correlaciones empíricas o semiempíricas para describir el flujo de fluidos, principalmente bifásicos. Sin embargo, los intervalos de presión, temperatura y gastos másicos no han sido establecidos exitosamente.

Por otro lado, los usuarios de los simuladores con frecuencia consideran que el proceso de los fluidos en el pozo es adiabático, debido a la falta de la información correspondiente. En ocasiones se considera que esta suposición es válida para gastos altos, o bien se considera razonable a pesar de la mínima información utilizada. También ocurre con frecuencia que los usuarios de los simuladores no tomen en cuenta la composición química de los fluidos por no contar con ella.



Fig. 1. Registro de presión (P-7) corrido en el pozo 426 del campo de Cerro Prieto. En esta figura se incorporan las profundidades de las diferentes mediciones.

Fig. 2. Registros simultáneos de presión y temperatura (P-7 y T-13) en el pozo 426.En esta figura se incorporan las curvas de saturación para concentraciones de NaCl de 5 % y 20 %.

Para ilustrar algunos de estos problemas, en las figuras 1 y 2 se presentan las mediciones de fondo registradas en el pozo 426 (registros P-7 y T-13) del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. Este pozo fue terminado originalmente con una tubería de producción de 9 5/8". El colgador del *liner* de 7" se instaló a 2558 m y se extendió hasta la profundidad de 3191 m. Como se puede observar en la Fig. 1, el perfil de presión corresponde, sin duda, a un fluido que pasa del estado líquido al estado bifásico. En la Fig. 2, sin embargo, se podrían inferir varias ocurrencias que no todas son necesariamente ciertas. En primera instancia, de acuerdo a esta figura se podría inferir que el fluido producido por el pozo 426 es vapor sobrecalentado que proviene de una fuente de líquido subenfriado (usualmente esto no ocurre); sin embargo, esto es falso pues se sabe que se encontraba produciendo fluidos bifásicos durante la corrida del registro simultáneo. Asimismo se podría argumentar que cuando menos uno de los registradores se encontraba descalibrado ya que las medicines más someras se encuentran fuera de la curva de saturación del agua pura. También se podría mencionar que el desplazamiento de estos puntos con respecto a la curva de saturación se debe al efecto de las sales contenidas

en el fluido. De acuerdo a los análisis químicos de los fluidos producidos, estos contienen 3% de sólidos totales disueltos (STD). No obstante, de las tablas termodinámicas para sistemas ternarios H_2O-CO_2 -NaCl (Sánchez-Upton, 2007) se observa que el contenido probable de sales tendría que ser aproximadamente de 20%.

Cuando es posible, los datos de presión generados por el simulador de pozos se comparan con los que se registraron en el interior del pozo, como medio de validación del simulador. En el caso en que el simulador se corra bajo la premisa de ocurrencia de un proceso adiabático en el pozo, y además cuando el gasto másico de fluido es pequeño, no es posible esperar buenos resultado. En estos casos, resulta obvio que los simuladores no son aptos para las condiciones termodinámicas correspondientes.

Metodología

En esta sección se describe el procedimiento que se propone para estimar el flujo de calor entre el pozo y la formación, basado en el procesamiento de los registros mecánicos o electrónicos de presión y en las propiedades termodinámicas del fluido, principalmente. Como se sabe, la información proveniente de los registros de fondo usualmente relaciona los parámetros termodinámicos medidos (presión y/o temperatura) con la profundidad. Precisamente las parejas ordenadas de presión-profundidad registradas dentro del pozo a distintos niveles se utilizan como punto de partida del presente estudio. Cabe señalar que durante la deducción de esta metodología se consideró que el fluido geotérmico exhibe un comportamiento termodinámico similar al del agua pura; sin embargo, la teoría se puede extender a los casos en que estos fluidos contengan concentraciones importantes de sales y de gases.

De acuerdo a la ecuación de conservación del *momentum* lineal de la mecánica de fluidos, las fuerzas de cuerpo por unidad de área son iguales al incremento de presión estática debido a una columna de fluidos, esto es

$$\Delta p = \overline{\rho} g \Delta z = \frac{g \Delta z}{\overline{\nu}} \tag{1}$$

donde Δp es el incremento de presión; $\overline{\rho}$ es la densidad media del fluido; g es la aceleración de la gravedad; Δz es la altura de la columna; y \overline{v} es el volumen específico medio del fluido. En este caso $\overline{v} = (v_u + v_d)/2$. Los subíndices u y d se refieren a las condiciones termodinámicas de presión y temperatura que prevalecen en las partes superior e inferior de la columna de fluido, respectivamente.

Entonces, a partir de la anterior formulación y utilizando dos parejas ordenadas de datos de presiónprofundidad se puede estimar el volumen específico medio del fluido (\bar{v}_{rp}) en el intervalo bajo estudio, esto es

$$\bar{v}_{rp} = g \frac{\Delta z}{\Delta p} = \frac{g}{\Delta p / \Delta z}$$
(2)

Con base en la ecuación (2) se interpreta que el volumen específico del fluido debe encontrarse a una presión que equivale a la presión media del intervalo en cuestión $[\overline{p} = (p_u + p_d)/2]$.

Para definir completamente el estado termodinámico del fluido en este intervalo se puede utilizar reiterativamente una ecuación de estado de la forma (Sánchez-Upton, 2007)

$$v = v(p,T) \tag{3}$$

donde T es la temperatura (absoluta) del fluido. Tomando en cuenta los resultados anteriores, la calidad de vapor se puede computar como

$$x_{rp} = \frac{\bar{v} - v_f}{v_g - v_f} \tag{4}$$

donde x_{rp} es la calidad de vapor; y v_f y v_g son los volúmenes específicos de las fases líquida y gaseosa a la presión media del intervalo, respectivamente. Cabe señalar que *T* en la ecuación (3) es la temperatura de saturación que corresponde a la presión media de este intervalo. Usando este criterio, sí $x_{rp} = 0$ el fluido se encuentra en la región de líquido subenfriado, sí $0 < x_{rp} < 1$ el fluido se encuentra en la región de líquido subenfriado, sí $0 < x_{rp} < 1$ el fluido se encuentra en la región de líquido subenfriado, sí $0 < x_{rp} < 1$ el fluido se encuentra en la región de líquido se puede estimar con

$$h_{rp} = h_l + x \left(h_g - h_l \right) \tag{5}$$

donde h_{rp} es la entalpía específica del fluido; y h_l y h_g son las entalpías específicas de las fases líquida y gaseosa a la temperatura de saturación, respectivamente. Las entalpías h_l y h_g se estiman a partir de una ecuación de estado de la forma (Sánchez-Upton, 2007)

$$h = h(p, T) \tag{6}$$

Para calcular la calidad del vapor y la entalpía específica del fluido cuando $x_{rp} = 0$ ó $x_{rp} = 1$, como es de esperarse, se requiere introducir en la computación la temperatura medida en el interior del pozo que corresponda. Siguiendo un procedimiento similar al que se acaba de describir, también se puede estimar la entropía específica del fluido.

La aplicación de las ecuaciones (2) a la (6), junto con datos de registros de presión, permite definir con razonable aproximación la distribución de la entalpía específica (h_{rp}) en el interior del pozo. Por otro lado, la entalpía específica de la mezcla (o de producción) es un parámetro que comúnmente se reporta como parte de la información que se genera de una prueba de producción de corta o larga duración. Sin embargo, la entalpía de producción se calcula usualmente en superficie a partir del método de presión crítica (James, 1962, 1970; Karamakar and Cheng, 1980; Sánchez-Upton, 1986), o bien a través del método de separación de fases y mediciones con placas de orificio (Sánchez-Upton, 1993). Es de esperarse entonces que las entalpías de producción y la calculada con la ecuación (5) sean similares a las condiciones del cabezal.

En los trabajos de simulación con frecuencia se considera que el fluido a lo largo del pozo experimenta ya sea un proceso isoentálpico, o bien un proceso adiabático. En general, se ha observado que los cambios de entalpía específica a través de un proceso adiabático (Δh_{ad}) son pequeños y dependen fundamentalmente de la distancia que el fluido recorre (Sánchez-Upton, 1990; Rodríguez *et al.*, 2006). Considerar que la distribución de entalpía específica es la de un pozo adiabático (h_{ad}) es una mejor aproximación que la de suponer un proceso isoentálpico. No obstante, cuando se genera un flujo de calor entre el pozo y la formación esta aproximación deja de ser válida.

Una manera de estimar la transferencia de calor entre el pozo y la formación se desprende de la diferencia que puede existir entre ambas entalpías (h_{rp} y h_{ad}). Precisamente, la diferencia de estas entalpías es una medida de la energía por unidad de tiempo que se intercambia a través de este sistema. Este intercambio de calor se puede representar matemáticamente como

$$\stackrel{\bullet}{q} = \stackrel{\bullet}{m} \frac{A_{had-hrp}}{z} = UA_{ht} \Delta T$$
(7)

donde q es la energía transferida (calor) por unidad de tiempo a través del incremento de longitud (Δz); m es el gasto másico de fluido; $A_{had-hrp}$ es el área que se forma entre las distribuciones de entalpías h_{rp} y h_{ad} (ver Fig. 6), cuando existe algún flujo de calor a través de este sistema; z es la longitud total de tubería que se encuentra sujeta al intercambio de calor; U es el coeficiente global de transferencia de calor; A_{ht} es el área de transferencia de calor (usualmente el área interna de la tubería de producción); y ΔT es la diferencia de temperaturas entre el fluido y la formación. El área $A_{had-hrp}$ se determina como sigue:

$$A_{had-hrp} = \int_{z_1}^{z_2} \int_{hrp}^{had} dh dz$$
(8)

donde z_1 y z_2 representan las posiciones inicial y final del área de transferencia de calor bajo estudio. Nótese que la longitud (o intervalo de longitud) a través de la cual ocurre el flujo de calor es $\Delta z = z_2 - z_1$. Es evidente que en el caso de que se requiera determinar el intercambio total de energía entre el pozo y la formación Δz será igual a la longitud total que comprende el área de transferencia de calor, es decir $z = \Delta z$.

El coeficiente de transferencia de calor para una pared compuesta por cuatro tuberías de revestimiento (como en la parte más somera de la mayoría de los pozos) toma la forma

$$U = \frac{1}{r_{it1}} \begin{cases} \frac{\ln \frac{r_{et1}}{r_{it1}} + \ln \frac{r_{it2}}{r_{et1}} + \ln \frac{r_{et2}}{r_{et1}} + \ln \frac{r_{it3}}{r_{it2}}}{\kappa_{a2}} + \frac{\ln \frac{r_{it3}}{r_{et2}}}{\kappa_{c2}} \\ \frac{\ln \frac{r_{et3}}{r_{it3}} + \ln \frac{r_{it4}}{r_{et3}} + \ln \frac{r_{et4}}{r_{et3}} + \ln \frac{r_{it4}}{r_{it4}} + \ln \frac{r_{h}}{r_{et4}}}{\kappa_{c4}} \\ \frac{\ln \frac{r_{et3}}{r_{et3}} + \ln \frac{r_{et3}}{r_{et3}} + \ln \frac{r_{it4}}{r_{et4}} + \ln \frac{r_{h}}{r_{et4}}}{\kappa_{c4}} \\ \frac{\ln \frac{r_{et3}}{r_{et3}} + \ln \frac{r_{et3}}{r_{et3}} + \ln \frac{r_{et4}}{r_{et4}} + \ln \frac{r_{h}}{r_{et4}}}{r_{et4}} \\ \frac{\ln \frac{r_{et3}}{r_{et3}} + \ln \frac{r_{et3}}{r_{et3}} + \ln \frac{r_{et4}}{r_{et4}} + \ln \frac{r_{h}}{r_{et4}}}{r_{et4}} \\ \frac{\ln r_{et4}}{r_{et4}} + \ln \frac{r_{et4}}{r_{et4}} \\ \frac{\ln r_{et4}}{r_{et4}} \\ \frac{\ln r_{et4}}{r_{et4}$$

donde r_{it} y r_{et} son los radios interno y externo de las diferentes tuberías de revestimiento; h_f es el coeficiente de transferencia de calor por convección (o coeficiente de película); k_a y k_c son las conductividades térmicas del acero y del cemento, respectivamente; y 1, 2, 3, 4 son los números de identificación de las diferentes tuberías. El área de transferencia de calor es entonces

$$A_{ht} = A_{it1} = 2\pi r_{it1}l \tag{9}$$

donde l es la longitud del intervalo bajo estudio. En el siguiente apartado se presenta un ejemplo de aplicación donde se computa la mayor parte de los parámetros que hasta ahora se han derivado.

Resultados

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron al aplicar la nueva metodología a los datos de presión del pozo 426, ya mencionado, del campo geotérmico de Cerro Prieto. Cabe señalar que dentro de los datos que se manejaron no se contempla el gasto másico ni la entalpía específica de producción porque el pozo se encontraba "purgado". Para calcular los parámetros que se derivaron en la sección precedente se desarrolló un programa de cómputo utilizando un Compilador Visual Fortran. En este programa se incorporaron los algoritmos requeridos para calcular las propiedades termodinámicas del agua pura (Sánchez-Upton, 2007).

En la Fig. 3 se exhibe la distribución del volumen específico medio en función de la presión media del fluido. En este plano p - v (del agua pura) se pueden advertir varios resultados interesantes. Por un lado, los puntos que se localizan en la parte más profunda del pozo se encuentran dentro de la región de líquido subenfriado, mientras que los de la porción más somera se localizan en la región bifásica (de dos fases). Por el otro lado, a pesar de que los fluidos bifásicos experimentan un incremento de la calidad de vapor (x) como resultado del abatimiento de presión, con mayor facilidad se detecta una reducción de la entalpía específica. Estos mismos resultados pueden observarse en el plano p-h de la Fig. 4.



Fig. 3. Comportamiento del fluido en el plano p-v (del agua pura), de acuerdo a la nueva metodología. Se exhiben las líneas de isocalidad e isoentalpía, principalmente

Fig. 4. Comportamiento del fluido en el plano p-h (del agua pura) de acuerdo a la nueva metodología. En esta figura se exhiben las líneas de isocalidad, principalmente.

En la Fig. (5) se muestra la distribución $\Delta p/\Delta z$ en función de la presión media del fluido. En el plano $\Delta p/\Delta z - p$ (del agua pura) se pueden percibir algunas otras peculiaridades. Probablemente la más interesante es aquella que se relaciona con el mezclado de fluidos. A partir de esta figura se puede inferir que el fluido proveniente de los estratos más profundos se mezcla con un fluido de mayor energía localizado a una profundidad aproximada de 2575 m.

La Fig. 5 también permite inferir el tipo de fluido que se encuentra en el interior del pozo, a partir de los registros de presión. Por ejemplo, utilizando los datos de presión de la Fig. 1, entre las profundidades de 2000 m y 3195 m, $\Delta p/\Delta z = 0.073$ por lo que la presión media es de aproximadamente 140 bar. Utilizando estos últimos datos como coordenadas en la Fig. 5, se encuentra que el fluido en el pozo se encuentra en la región de líquido subenfriado. Asimismo, entre las profundidades de 20 m y de 1000 m, $\Delta p/\Delta z = 0.02$ y la presión media es 40.4 bar. A partir de estas nuevas coordenadas se infiere que el fluido es bifásico en esta porción del pozo, teniendo una calidad de vapor entre 0.05 y 0.10 (5% y 10%, respectivamente), como también se puede observar en las figuras 3 y 4.

Por otro lado, la entalpía específica de producción deducida de los registros de fondo fue 1378.2 kJ kg⁻¹ (a 2450 m de profundidad), como se puede inferir de la Fig. 2, después del punto de mezclado. Como se mencionó anteriormente, la variación de la entalpía específica a lo largo de un proceso adiabático es función

directa de la distancia que el fluido recorre (Sánchez-Upton, 1986; Rodríguez *et al.*, 2006). De acuerdo a las observaciones, para líquidos y flujos bifásicos el incremento de entalpía específica es aproximadamente igual al 1 % de la distancia recorrida ($\Delta h_{ad} = 0.01 \Delta z$), mientras que para vapor es 5% ($\Delta h_{ad} = 0.05 \Delta z$) (Sánchez-Upton, 1986). Considerando esta "regla de dedo", es de esperarse que la entalpía específica del fluido sea 1356.3 kJ kg⁻¹ a 260 m de profundidad, como se observa en la Fig. 6.



Fig. 5. Comportamiento del fluido en el plano Δp/Δz-p (del agua pura), de acuerdo a la nueva metodología. En esta figura se exhiben las líneas de isocalidad y las características del punto crítico, principalmente.

Fig. 6. Comparación de la entalpía calculada con la nueva metodología y la que se espera que ocurra cuando se tiene un proceso adiabático. Se muestran los polinomios de ambas curvas a partir de métodos de regresión lineal y no lineal.

En la Fig. 6 se presenta la distribución de entalpía que resulta después de aplicar la nueva metodología (h_{rp}) , y la distribución de entalpía que se espera suponiendo un proceso adiabático (h_{ad}) . Como se estableció previamente, el área entre ambas curvas es una medida de la transferencia de calor por unidad de tiempo entre el pozo y la formación. Para el ejemplo (recordando que se desconoce el gasto másico), se supondrá que el gasto másico de fluido fue de 1 kg s⁻¹ (3.6 t h⁻¹), cuando el pozo se encontraba purgado. De esta manera, aplicando las ecuaciones (7) y (8), la energía total por unidad de tiempo que se transfirió del fluido a la formación fue de 83 kW, aproximadamente. Se debe notar que el fluido en su recorrido a la superficie está perdiendo esta energía por unidad de tiempo, por tanto, el término que representa la razón de transferencia de

calor debe tener signo negativo $\left(-q\right)$.

Discusión

Los estudios de simulación usualmente se realizan considerando que el proceso en el interior del pozo es adiabático, es decir, considerando que no se genera flujo de calor entre el sistema pozo-formación. A través del desarrollo de esta investigación se observó que esta suposición no es adecuada, principalmente cuando los gastos másicos de fluido son pequeños. A partir del análisis de las ecuaciones de conservación (para fluidos homogéneos) aplicadas a un pozo:

4000

cantidad de movimiento
$$p_2 - p_1 + \left\{ \frac{1}{2} \frac{f}{D} G^2 \bar{v} + \frac{g \cos \theta}{\bar{v}} \right\} (z_2 - z_1) + G^2 (v_2 - v_1) = 0$$
 (10)

energía
$$h_2 - h_1 + \frac{1}{2}G^2(v_2^2 - v_1^2) + g\cos\theta(z_2 - z_1) = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ q + w \end{pmatrix}$$
 (11)

se puede inferir esta misma conclusión. Se observa en la ecuación (11) que el efecto debido a la transferencia de calor se minimiza cuando el gasto másico de fluido $\begin{pmatrix} \cdot \\ m \end{pmatrix}$ es grande. Se debe notar en esta ecuación que el

trabajo de flecha $\begin{pmatrix} \bullet \\ w \end{pmatrix}$ es idénticamente nulo en estas aplicaciones.

Como es de esperarse, el volumen específico del fluido juega un papel importante en la solución de las ecuaciones (10) y (11), tanto para fluidos monofásicos como bifásicos. De este grupo de ecuaciones se observa que para encontrarse una solución, el volumen específico (\bar{v}) , la presión (p) y la entalpía específica (h) deben estar interrelacionadas través de una ecuación de estado (EOS).

Al explorar la ecuación (10) se observa que tanto el efecto del flujo másico de fluido (G) como el del factor de fricción (f) son incomparables con el efecto que tiene (\bar{v}) . De esta manera, es necesario contar con una buena estimación de (\bar{v}) principalmente cuando se pretende modelar el flujo de fluidos bifásicos. Esta misma necesidad surge cuando se requiere estimar la fracción vacía de vapor (*void fraction*), utilizada en los modelos de flujo separado.

Conclusiones

Las principales conclusiones del estudio se pueden ordenar de la siguiente manera:

a) De acuerdo con la teoría fundamental en que se basa el presente estudio, es posible determinar de manera aproximada el volumen específico del fluido, a partir de registros de presión. Por tanto, también es posible estimar la calidad del vapor y la entalpía específica del fluido.

b) A través de este método es posible detectar la presencia de diferentes zonas de producción y definir su localización.

c) La utilización del plano $\Delta p/\Delta z - p$ permite discernir el estado termodinámico del fluido (líquido, dos fases, vapor) dentro del pozo.

d) El intercambio de calor entre el pozo y la formación se puede estimar a partir de las distribuciones de entalpía h_{ad} y h_{rp} .

e) Los resultados del estudio son invariantes aún cuando los perfiles de presión se ajustan a través de métodos de regresión no lineal.

f) La información está influenciada por los errores involuntarios que se introducen a través de las mediciones de campo. Esto se debe fundamentalmente a la dificultad que representa la medición de los parámetros relacionados con la producción de fluidos (p.e., gastos másicos, entalpía específica, mediciones de fondo).

g) Se requiere hacer un análisis relacionado con la incertidumbre de los resultados de los simuladores.

h) La estimación del volumen específico del fluido, como se ha propuesto, es fundamental para estimar los factores de fricción y la fracción vacía de la fase gaseosa (*void fraction*) que se requieren en los modelos de flujo homogéneo y de fases separadas, respectivamente. Ambos parámetros se emplean para estimar los gradientes de presión que se desarrollan durante el transporte de los flujos bifásicos, principalmente.

i) Cuando se inició el primer periodo de explotación del pozo se registraron los siguientes parámetros de producción: presión de cabezal 30.3 bar, gasto másico 35 kg s⁻¹, y entalpía de producción 1258 kJ kg⁻¹. De acuerdo con los resultados del estudio, la transferencia de calor del pozo a la formación continúa a pesar de que el gasto es aparentemente grande.

j) Tomando en cuenta los resultados del estudio, es necesario definir la magnitud del gasto másicos de fluido que minimiza el efecto de transferencia de calor en este sistema.

Referencias

- James, R. (1962) Steam-water critical flow through pipes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London, v. 176, no. 26, pp. 739-748.
- James, R. (1970) *Measurement of steam-water mixtures discharging at the speed of sound to the atmosphere.* New Zealand Engineering, v. 2, Part 2, pp. 437-441.
- Karamarakar, M. and P. Cheng (1980) A theoretical assessment of James' method for the determination of geothermal wellbore discharge characteristics. Geothermal Reservoir Engineering Management Program, Earth Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley.
- Rodríguez R., M.H., J.S. de León V., A. Pérez H., y M. Corona R. (2006) Relación entre la terminación de pozos y la producción de vapor para el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, v. 19, no. 1, pp. 41-51.
- Sánchez-Upton, P. (1986) Alternativas para la evaluación de la entalpía y del flujo en pozos productores de vapor. *Geotermia*, v. 2, no. 1, pp. 71-82.
- Sánchez-Upton, P. (1990) Different feed zones detection in a well through its production output curves. *Fifteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford Geothermal Program, Stanford University, 6 p.
- Sánchez-Upton, P. (1993) The evaluation of steam-water mixtures with sharp edged circular orifices. *Geotermia*, v. 9, no. 3, pp. 321-343.
- Sánchez-Upton, P. (2007) Modelado numérico del flujo vertical ascendente de flujos bifásicos tricomponentes (H₂O-CO₂-NaCl) en pozos geotérmicos. Tesis doctoral, CIE-UNAM (en preparación).

A preliminary interpretation of gas composition in the CP IV sector wells, Cerro Prieto geothermal field, Mexico

Rosa María Barragán Reyes¹, Víctor M. Arellano Gómez¹, Enrique Portugal Marín¹, Alfredo Pérez Hernández², Marco Helio Rodríguez Rodríguez² y Jesús de León Vivar²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113, Col. Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor., México, ²Comisión Federal de Electricidad, Residencia General Cerro Prieto, Carretera Pascualitos-Pescaderos, km 26.5, B.C, México. Correo: <u>rmb@iie.org.mx</u>

Abstract

To increase the electrical generation capacity of the Cerro Prieto geothermal field from 620 MW to 720 MW, the Cerro Prieto IV (CP IV) sector of the field was developed in the NE portion of the exploited field. Fourteen new wells have been drilled there since 2000. The wells in CP IV zone produce two-phase fluids at wellhead with heterogeneous steam fraction characteristics: at the central zone and towards the NW, the wells are liquid-dominated while those towards the E and S produce a relatively high steam fraction. This work studies the gas compositions of produced fluids to obtain reservoir parameters such as temperature and steam fraction and identify different sources of fluids in the wells. A method was used based on the Fischer Tropsch reaction and H₂S equilibria with pyrite-pyrrhotite as a mineral buffer (FT-HSH3). The results for the "natural state" showed the presence of fluids with reservoir temperatures from 275 to 310° C and excess steam values from -1 to 50%. Data are aligned in a FT-HSH3 trend, suggesting that the well discharges consist of a mixture in different proportions of the two end members. One seems to be a liquid with a temperature of over 300° C with negative or negligible excess steam. The other seems to be a two-phase fluid with a temperature of about 275° C and an excess steam fraction of about 0.5. According to the data for single wells and depending on the production conditions of the wells, reservoir fluid mixtures could occur in different proportions of liquid and steam. Data for 2005 that included wells drilled after 2000 suggest the presence of a steam phase in the reservoir. The steam could be generated with the boiling of deep reservoir fluid from a pressure drop. The mixing trend obtained for the natural state was also seen for 2005 data but lower temperatures (from 265 to 295° C) were obtained compared with those for natural conditions. The entry of lower-temperature fluids descending through the H fault to the reservoir was inferred, since results for the wells affected by this process (located at the center of the CP IV area) showed small or negative excess steam values and slightly lower temperatures (265-270° C).

Keywords: Cerro Prieto, geothermal fluids, gas composition, chemical equilibrium

Interpretación preliminar de la composición gaseosa de pozos del sector CP IV del campo geotérmico de Cerro Prieto, México

Resumen

A fin de aumentar la capacidad de generación de 620 a 720 MW, se desarrolló el sector Cerro Prieto IV (CP IV) en la porción NE del campo geotérmico de Cerro Prieto, donde se perforaron catorce pozos nuevos a partir del año 2000. Los pozos de la zona de CP IV producen fluidos bifásicos con características heterogéneas en cuanto a la fracción de vapor: en la porción central y hacia el NW los pozos producen líquido dominante mientras que hacia el E y S producen una fracción de vapor relativamente alta. En este trabajo se estudia la composición gaseosa de los fluidos producidos para obtener parámetros del yacimiento

tales como la temperatura y la fracción de vapor e identificar diferentes aportes de fluidos a los pozos. Se utilizó un método basado en la reacción de Fischer Tropsch y el equilibrio del H₂S con pirita-pirrotita como amortiguador (FT-HSH3). Los resultados para el estado inicial indican que existen fluidos con temperaturas de vacimiento entre 275 y 310° C así valores de exceso de vapor entre -1 y 50%. Los resultados se alinean en un patrón de mezcla FT-HSH3 que sugiere que los pozos descargan una mezcla de los dos miembros finales en diferentes proporciones. Uno de ellos parece ser un líquido con una temperatura superior a los 300° C con exceso de vapor negativo o insignificante. El otro parece ser un fluido bifásico con temperatura de unos 275° C y un exceso de fracción de vapor de aproximadamente 0.5. De acuerdo con datos de cada pozo y dependiendo de las condiciones de producción de cada uno, pueden ocurrir mezclas de fluidos con diferentes proporciones de líquido y vapor en el vacimiento. Datos de 2005 de pozos perforados después del año 2000 sugieren la presencia de una fase de vapor en el vacimiento, que podría generarse por la ebullición de fluidos profundos debido a una caída de presión. El patrón de mezcla obtenido para el estado inicial se observó también en los datos de 2005, pero se obtuvieron temperaturas menores (de 265 a 295° C) que las del estado inicial. Se infirió la entrada al vacimiento de fluidos de menor temperatura que descienden por la Falla H, ya que los resultados en los pozos afectados por este proceso (ubicados al centro del área de CP IV) presentaron valores de exceso de vapor negativos o mínimos, y temperaturas ligeramente inferiores (265 a 270° C).

Palabras clave: Cerro Prieto, fluidos geotérmicos, composición gaseosa, equilibrio químico

1. Introduction



Fig. 1. Location of Cerro Prieto and the CP IV sector

for data previous to year 2000 is shown.

To increase the electric generation capacity of the Cerro Prieto geothermal field from 620 MW to 720 MW, the Cerro Prieto IV (CP IV) sector (Figure 1) was developed (Quijano-León y Gutiérrez-Negrín, 2001). This is located at the NE portion of the exploited field, where fourteen new wells were drilled since 2000 to date. Detailed reservoir studies have been developed for CP IV area (Portugal *et al.*, 2006) to estimate the "natural state" characteristics of the reservoir and also to investigate the changes due to exploitation.

The wells in the CP IV zone produce two-phase fluids at wellhead with heterogeneous characteristics regarding steam fraction: at the central zone and towards the NW, the wells are liquid-dominated while those towards the E and S produce a relatively high steam fraction. This is seen in Figure 2 where the distribution of production enthalpy of the wells

According to the "natural state" geochemical characteristics, the discharged fluids showed almost the same pattern of chemical composition but dilution effects are seen in some wells, and different pH values (ranging from 5 to 8) were found. This dilution was attributed to the presence of condensate in wells where important boiling occurs and also to the entry of shallower lower temperature fluids in wells located at the center of CP IV (Portugal *et al.*, 2006). Chemical geothermometers (TCCG, TNa-K-Ca) indicated temperatures between 280-310° C. Although most of the fluids exhibited total equilibrium in a triangular Na-K-Mg diagram, few of

them showed partial equilibrium. The chemical characteristics of single wells also varied with time depending on the production conditions of the wells.

As there is a high enthalpy zone in CP IV and hence production of two-phase fluids with a relatively high steam fraction located to the East, the study of the gas phase becomes important to obtain reservoir parameters. Thus the objective of this work is to identify different fluids feeding the wells by obtaining reservoir parameters (temperature and steam fraction) in the Cerro Prieto IV sector. The FT-HSH3 method based on gas composition using the Fischer Tropsch reaction and H₂S equilibria with pyrite-pyrrhotite as mineral buffer (Siega *et al.*, 1999) were used.

2. Methodology

Gas equilibria considering the Fischer-Tropsch (FT) (CH₄ + $2H_2O = 4H_2 + CO_2$) reaction together with the pyritepyrrhotite (HSH3) (FeS₂ + H₂ = FeS + H₂S) (Siega *et al.*, 1999) combined reactions were used. This mineral buffer seems to control the H₂S in the fluids at CP IV. The presence of the proposed mineral buffer at reservoir and the fact that reservoir temperatures estimated by the FT-HSH3 diagram compare well with results from geothermometers based on liquid phase composition, were the basis to select the FT-HSH3 method. The FT-HSH method was used before to obtain reservoir temperature and excess steam for Cerro Prieto data (D'Amore and Truesdell, 1985), but for CP IV wells rather low temperatures compared with results from FT-HSH3 method were obtained.



Another approach (FT-HSH2) (D'Amore, 1998; Barragán

et al., 2006) that considers more oxidizing conditions at reservoir, which implies high H_2S but low H_2 concentrations, was considered not suitable for the CP IV data since relatively high H_2 concentrations were found. The reservoir temperature and the reservoir excess steam (y) are provided as results in a graphical form and the trends observed for the data on the grids were interpreted.

3. Results

3.1 Initial conditions

Figure 3 shows the results obtained for the wells at initial conditions (up to year 2000) in a FT-HSH3 diagram. The location of the data points suggests that different fluids enter the wells at CP IV following an approximate lineal trend indicating possible mixing of fluids. Data of Figure 3 were fitted in order to find the main characteristics of the two hypothetical end members corresponding to the fluids entering the wells.

The regression had a significant correlation coefficient (0.93) suggesting that the wells produce mixtures in different proportions of two main components. The end members basically are as follows: a liquid phase of

about 310° C characterized by the fluid produced by well 426, and a two-phase fluid with a reservoir steam fraction of almost 0.5 and a temperature of about 275° C, characterized by the well NL-1. These FT-HSH3 results suggested the presence of a steam phase at Cerro Prieto IV that could be originated by boiling of deep liquid. Then, if phase segregation occurs, preferential flow of steam to the wells will produce high values of excess steam (Truesdell *et al.*, 1992). By means of gas data, Nieva *et al.* (1982) also evidenced the pre-existence of steam at Cerro Prieto I, and among other studies that indicated the occurrence of two-phase fluids at reservoir, the mixing of fluids with steam was found at Cerro Prieto by Stallard *et al.* (1987).



3.2 Single wells behavior

The behavior of the CP IV gas data for single wells in the FT-HSH3 diagrams also shows the mixing pattern seen previously. As an example, in Figure 4 the FT-HSH3 diagram for the well NL-1 is given. This well is located toward the relatively high enthalpy area, its enthalpy for initial conditions was 2300 kJ/kg (see Figure 2). Data are aligned indicating the well produces mixtures in different proportions of liquid and steam end member fluids occurring at the reservoir.

According to the FT-HSH3 method, a very high temperature (335° C) liquid (with a deficit of reservoir steam) entered the well in point number 5 and was produced in 1997 when the well registered a production

enthalpy of 1900 kJ/kg. In contrast, the other extreme of the mixing line represents a fluid with a lower temperature, of about 275° C, and a reservoir steam of about 70%. This fluid was produced in 1995-1996.



Other example is given for well 407 which is located at the center of the CP IV area in a low enthalpy zone (see Figure 2), where influence of the H Fault is evident because of the production of liquid dominated fluids. Figure 5 shows the FT-HSH3 diagram for well 407. The data points are almost aligned showing that the well produces a mixture of steam dominated two phase fluid and a liquid phase (with a deficit of reservoir steam). At the beginning (point number 1) the well produced a 275° C fluid with a reservoir steam 20% but at other times (points number 2 and 6) the well produced liquid phase at about 285° C. The last point (number 7) indicates production of a fluid of about 270° C and a negligible excess reservoir steam (1%). The lower temperature and the negligible reservoir steam obtained for the point number 7 agree with other evidences that indicate the input of shallower lower temperature waters to the reservoir through the H Fault.

The behavior shown by wells NL-1 and 407 is representative of practically all the other wells at CP IV and it was interpreted in terms of mixing of basically two end members. It seems that depending on the production conditions, pre-existent reservoir steam enters the wells in different proportions.

3.3 Present conditions

The FT-HSH3 diagram for the wells according to 2005 gas data (September 2005) is shown in Figure 6 (point for the well NL-1 corresponds to November data). The trend observed indicates that the mixing process is important in the CP IV area since the points are aligned in a trend showing that the wells fluids consist of different proportions of the end member fluids identified before.



In Figure 6 the point of the well 425 which started operating in 2005, is interpreted as constituted by practically reservoir steam phase. In contrast, the fluid produced by the wells 406, 407, and 230D comes from a liquid phase with negligible reservoir steam (1%), with a temperature of about 275° C. As mentioned, according to detailed reservoir studies (Portugal *et al.*, 2006), this fluid is descending to the reservoir from a shallower aquifer through the H Fault, because of pressure drop due to exploitation.

In Figure 7 the deuterium-oxygen-18 composition of the fluids for 2005 data is given. As shown in Figure 7, the deuterium content of high enthalpy fluids is higher than that for low enthalpy fluids, which is due to the fact that deuterium is slightly partitioned to the steam phase at reservoir temperatures. The relatively light isotopic composition of the fluids from wells 406 and 407 compared to that of the other CP IV wells is probably due to the entry of such lower temperature water descending through Fault H to the production zone of the wells. In contrast, towards the East, where high enthalpy wells are located, it seems that a steam phase originated by boiling of deep fluids is present. This steam contains a relatively high gas proportion, which could be related to the up-flow of magmatic gases that according to Truesdell *et al.* (2003) occurs not far from CP IV.



4. Conclusions

Gas data from the CP IV zone of the Cerro Prieto geothermal field was studied by using the FT-HSH3 method, and a mixing process was inferred to occur in well discharges that implies the pre-existence of steam at reservoir. One end member consists of liquid phase with temperature higher than 300° C. The other consists of steam phase that was produced by boiling of deeper fluids at reservoir and could be enriched in gases since the gases up-flow probably occurs near to CP IV. Income of lower temperature fluids descending through the Fault H to the reservoir was also observed in the FT-HSH3 diagrams. This occurs mainly in wells located at the center of the CP IV sector, where the wells 406 and 407 are located.

Acknowledgments

CFE authorities are acknowledged for providing data and for allowing publication of this work. Results of this work are part of the project "Geoscientific studies of the Poligono Hidalgo (CP IV sector), Cerro Prieto Mexico wells" developed jointly by CFE-IIE in 2006.



Fig. 7. $\delta D vs \delta^{18} O$ for fluids of CP IV area

References

- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, and N. Segovia (2006). Changes in gas composition of the Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to exploitation. *Transactions* of the Geothermal Resources Council, Vol. 30, pp. 9-14.
- D'Amore, F., and A.H. Truesdell (1985). Calculation of reservoir temperatures and steam fraction from gas compositions. *Transactions* of the Geothermal Resources Council, Vol. 9, Part 1, pp. 305-310.
- D'Amore, F. (1998). *Time evolution of chemical and physical parameters of the reservoir fluid in Ahuachapan geothermal field (El Salvador)*, Report for the IAEA, 210 p.
- Nieva, D., J.J. Fausto, J. González and F. Garibaldi (1982). Flow of vapor into the feeding zone of Cerro Prieto I wells. *Fourth Symp. on the Cerro Prieto Geothermal Field*, Baja California, Mexico, Guadalajara, Jal., Mexico, August 10-12, 1982.

- Portugal, E., V.M. Arellano, A. Aragón, R.M. Barragán, G. Izquierdo, y J. Torres (2006). Estudios geocientíficos del Polígono Hidalgo del campo geotérmico de Cerro Prieto. Internal Report IIE/11/12875. Unpublished.
- Siega, F. L., N.D. Salonga, and F. D'Amore (1999). Gas equilibria controlling H₂S in different Philippine geothermal fields. *Proc.* 20th Annual PNOC-EDC Geothermal Conference, Manila, Philippines, pp. 29-35.
- Stallard, M. L., T.L. Winnett, A.H. Truesdell, T.B. Coplen, C. Kendall, L.D. White, C.J. Janik, and J.M. Thompson (1987). Patterns of change in water isotopes from the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: 1977-1986. *Transactions* of the Geothermal Resources Council, Vol. 11, pp. 203-210.
- Quijano-León, J. L., and L.C.A. Gutiérrez-Negrín (2001). Geothermal production in Mexico in the year 2000. *Transactions* of the Geothermal Resources Council, Vol. 25, pp. 593-596.
- Truesdell, A., A. Mañón, L. Quijano, T. Coplen, and M. Lippmann (1992). Boiling and condensation processes in the Cerro Prieto Beta reservoir under exploitation. *Proc. Seventeenth Workshop on Geoth. Res. Eng.*, Stanford CA., SPG-TR-141, pp. 205-214.
- Truesdell, A. H., M.J. Lippmann, M.H. Rodríguez, and A. Pérez (2003). Influence of reservoir processes on gas in Cerro Prieto steam. *Transactions* of the Geothermal Resources Council, Vol. 27, pp. 335-340.

Tres años de monitoreo sísmico pasivo en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., México

Carlos Valdés González¹ y Héctor Pérez Esquivias²

¹Instituto de Geofísica, UNAM, ²Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Los Azufres, Campamento Agua Fría, Michoacán, México. Correo: <u>hector.perez01@cfe.gob.mx</u>

Resumen

En el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., la Comisión Federal de Electricidad (CFE) implementó una red sísmica para monitorear el área, con lo cual se pretende conocer el comportamiento de las rocas del subsuelo, detectar fallas activas locales o regionales y su relación con el sistema hidrotermal, y tratar de definir si el movimiento de fluidos tiene una relación directa con la actividad sísmica registrada. En tres años de monitoreo se han podido registrar 117 sismos dentro del campo geotérmico, entre los cuales se identificaron microsismos de tipo tectónico, telesismos y sismos de tipo armónico relacionados con el movimiento de fluidos en pozos cercanos a algunas de las estaciones de monitoreo. El análisis de los sismos revela que en la zona suroeste del campo los eventos parecen alinearse en tres principales tendencias, que son NNW-SSE, E-W y NNE-SSW.

Palabras clave: Los Azufres, sismología, tectónica, movimiento de fluidos geotérmicos.

Three years of passive seismic monitoring at the Los Azufres geothermal field, Mich., Mexico

Abstract

The Comisión Federal de Electricidad (CFE) installed a seismic net at the Los Azufres geothermal field, Mich. The area was monitored to determine the features of the underground rocks, to detect active regional or local faults and their relationships to the hydrothermal system, and to try to define whether or not the fluid movement is directly related to the registered seismicity. During three years of monitoring, 117 seismic events were detected in the geothermal field, including tectonic microseisms, teleseisms and harmonic seisms related to fluids movements in wells near some monitoring stations. Analyses of the seisms indicate that at the southwestern part of the field, the events seem to align into three main directions: NNW-SSE, E-W, and NNE-SSW.

Keywords: Los Azufres, seismology, tectonics, geothermal fluid movement.

1. Introducción

Este trabajo es resultado de tres convenios realizados con el Instituto de Geofísica de la UNAM para el estudio de la actividad sísmica en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, en un lapso de tres años. El estudio y monitoreo de la microsismicidad en campos geotérmicos se ha llevado a cabo en muchos lugares del mundo (Phillips *et al.*, 2002; Munguía and Wong, 1995; Segall, 1989; Eberhart-Phillips and Oppenheimer, 1984), porque se pueden proponer modelos de comportamiento de los yacimientos con base en el análisis de microsismicidad.

El objetivo de este estudio es conocer el tipo de actividad sísmica que ocurre en Los Azufres, definir cuáles son los eventos sísmicos más representativos, su ubicación, magnitud y correlación con estructuras geológicas locales y regionales, así como con el movimiento de fluidos del yacimiento geotérmico. Los resultados de este estudio contribuirán a un mejor conocimiento de la actividad sísmica del campo, saber si existen fallas activas y cómo se mueven, su relación con el yacimiento y si algunos microsismos se producen por el movimiento de fluidos. También se pueden definir zonas de riesgo para las instalaciones de la CFE.

Los Azufres debe su nombre a una pequeña acumulación de azufre nativo, rodeado por una zona de manifestaciones geotérmicas naturales. El campo se encuentra en el sector noreste del Estado de Michoacán, a una elevación de 2800 metros sobre el nivel medio del mar y rodeado por un bosque de pinos. El campo se localiza a 90 km al este de la Ciudad de Morelia y a 250 km al este de la Ciudad de México (Figura 1).





Desde un punto de vista tectónico, el campo está localizado en el sector central de la Faja Volcánica Mexicana (FVM), resultado de la subducción activa de la Placa de Cocos por debajo de la de Norteamérica, a lo largo de la Trinchera Mesoamericana, donde se genera una gran cantidad de sismos y actividad volcánica. La Figura 1 muestra la ubicación de Los Azufres (recuadro). Secuencias de sismos registrados en esta región

por el Servicio Sismológico Nacional y por otros estudios temporales, se indican con círculos grises. Los círculos amarillos representan una secuencia sísmica cerca de Maravatío.

2. Trabajo de campo e instrumentos

Durante los primeros dos años la detección sismológica se realizó con cuatro sismógrafos digitales Spregnether DR-3016 con sismómetros triaxiales S-3000 de la misma marca y un sismógrafo K2 con un acelerógrafo (episensor) propiedad de la CFE ubicados en los sitios 1 a 5 de la Tabla 1. Para el tercer año se incorporaron tres estaciones más (sitios 6 a 8, Tabla 1), con sismógrafos digitales Reftek (uno Modelo 72 y dos Modelo 130) con sensores triaxiales de banda ancha marca Guralp CMG-40T, propiedad de la UNAM.

Estación No.	Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	Gachupina	19°49.27'	100° 39.30'
2	Nopalito	19°50.10'	100° 40.68'
3	Agua Escondida	19°49.44'	100° 41.96'
4	El Chino	19°48.49'	100° 41.13'
5	Marítaro	19°49.35'	100° 40.24'
6	Mono	19°46.05'	100° 40.99'
7	Jilguero	19°47.02'	100° 38.31'
8	EAZ2	19°48.11'	100° 43.63'

Tabla 1. Estaciones sismológicas en el campo de Los Azufres

Cada sitio cuenta con una caseta de protección y con un pilar de concreto para la instalación del sensor. En algunos sitios las casetas se encuentran en zonas boscosas, por lo que los niveles de ruido no fueron óptimos. La diferencia de equipos, los DR-3016, K2 y Reftek (Modelo 72) con grabación en disco y el Reftek (Modelo 130) con grabación en tarjeta, dificulta la compatibilidad de formatos para el procesamiento de datos, así como la normalización de los criterios de detección de las señales de origen sísmico y el control de tiempo, ya que los equipos constan de GPS de muy diferente fabricación. No obstante, en general los resultados obtenidos son buenos.

3. Evaluación de la red sísmica con HYPOERROR

El desempeño de un arreglo sísmico se evalúa en términos de la precisión con que es capaz de localizar eventos sísmicos dentro de un volumen o región dados. También es importante conocer la importancia relativa de los datos registrados por estaciones individuales en la red sísmica. Formalmente, el problema de localización de sismos es un problema inverso. El método usado para resolver este problema inverso ha sido descrito por Jackson (1972) y Wiggins (1972). Para una adecuada localización, se necesitan cuatro parámetros: las coordenadas espaciales X, Y, Z, y el tiempo de origen. La precisión de una red sísmica puede ser evaluada en término de los errores de cada uno de estos parámetros.

En los primeros dos años del monitoreo en Los Azufres se usó el programa HYPOERROR (Lienert *et al.*, 1986) para evaluar el desempeño del arreglo sísmico de las cinco primeras estaciones que conformaron la red, debido a que la distribución de las estaciones fue la misma. Este programa fue aplicado con el modelo de velocidades que se describe más adelante. El programa consideró un error promedio de 0.05 y 0.10 segundos en la determinación de los arribos de las ondas P y S, respectivamente.

La Figura 2 muestra un mapa con el cálculo de la incertidumbre en la determinación de la profundidad de los epicentros dentro de la región mostrada y a una profundidad de 4 km. Dentro de los límites de las estaciones, y para esta profundidad, los errores en la determinación de la profundidad se encuentran entre los 0.1 y 0.6 km. Un análisis similar al anterior se llevó a cabo para el cálculo de la incertidumbre de la red en el plano horizontal de los sismos.

La Figura 3 corresponde a la incertidumbre horizontal para la profundidad de 4 km, obteniéndose valores dentro de la red que fluctúan entre los 0.05 y 0.1 km.

La evaluación de la incertidumbre, tanto en profundidad como en el plano horizontal, muestra que la red de cinco estaciones funcionó bien para determinar sismos localizados en ella hasta 4 km de profundidad. Sin embargo, era necesario mejorar la precisión de la localización a mayores profundidades y hacia el sur del primer arreglo, para lo cual se instalaron tres estaciones más a partir del tercer año de monitoreo, que quedaron ubicadas al sur del primer arreglo. En este caso no se evaluó el desempeño del nuevo arreglo de ocho estaciones con el programa HYPOERROR, pero se observó claramente una mejoría en el control de la profundidad, una vez que las estaciones del sur comenzaron a registrar. Con las ocho estaciones hubo una mejor definición en el cálculo de la profundidad de los sismos registrados, mejorando claramente la limitante de los 4 km de profundidad y llegándose a localizar un sismo de hasta 7 km bajo la nueva red ampliada.



Fig. 2 (Izquierda). Incertidumbre para la profundidad Z = 4 km. Fig. 3 (derecha). Incertidumbre del plano horizontal XY para la profundidad Z = 4 km.

4. Identificación de sismos

Debido a que se usaron cuatro tipos de sismógrafos diferentes para evaluar la sismicidad de Los Azufres, y a que no existían programas para una evaluación conjunta de los datos, fue necesario hacer una evaluación individual de los registros sísmicos de cada tipo de equipo. Los archivos individuales de las estaciones con equipos DR3016 y K2 fueron transformados a un archivo ASCII, para luego modificarse con el programa TRESA1, expresamente escrito para producir tres archivos (uno por canal) y que fueran aceptables para ser leídos con el programa PITSA (Scherbaum y Johnson, 1992). Los datos de los equipos Reftek, fueron leídos con el programa RT-View, para revisar sismos.

De la medición sísmica en la zona a lo largo de tres años y del análisis de 13 mil 913 sismogramas, fue posible identificar 117 eventos sísmicos coincidentes, registrados por tres estaciones o más, y/o por dos o más, en la zona de Los Azufres. Entre ellos se identificaron microsismos tectónicos que presentan claros



Fig. 4. Sismo local con S-P= 0.3 s con una distancia a la estación de 1.2 a 1.5 km.

arribos de las ondas P y S, y cuya coda decae en forma exponencial. Estos sismos están asociados fracturamiento de rocas, debido a esfuerzos que se presentan en el interior de la Tierra. Los denominamos microsismos, porque son muy pequeños, se encuentran a menos de 5 km de distancia de la estación, y a que hay ciertos niveles de atenuación en las estaciones del campo, provocadas por el ruido generado por la extracción de vapor, la inyección de fluidos y por la presencia de árboles que imprimen un movimiento al suelo (ruido) al ser agitados por el viento.

La Figura 4 presenta un sismograma de uno de los más representativos de esos eventos de tipo tectónico, registrado en la estación 3 (Agua Escondida), donde se aprecian las ondas P y S con una diferencia de tiempo

entre ellas de un poco más de 0.3 segundos, lo que ubica al sismo a una distancia aproximada de entre 1.2 y 1.5 km de la estación. También observamos otros sismos tectónicos con mayores diferencias de S-P, como el de la Figura 5, que indica que los eventos están más alejados de las estaciones de registro, y que están asociados a otros sistemas de fracturamiento.

Entre los 117 eventos detectados, hubo también telesismos. Los denominamos así, porque sus epicentros se encuentran a varias decenas o centenas de kilómetros de Los Azufres.

Otro tipo de señales registradas, principalmente en la estación de Agua Escondida, estuvieron relacionadas con la vibración producida por el movimiento de fluidos en el pozo inyector Az-61 cercano a esa estación (Figuras 10 y 11) las cuales se describen más adelante.



que VT

5. Localización de sismos

Para localizar los 117 eventos sísmicos identificados se utilizó el programa HYPOCENTER (Lienert *et al.*, 1986), ya que su capacidad de centrado, escalado y amortiguamiento, lo hacen un programa superior. El modelo de velocidades usado se presenta en el recuadro siguiente:

Velocidad de	Profundidad a	
la Onda P	la parte superior	
(km/s)	de la capa (km)	
3.5	0	
4.0	1	
6.0	3	
6.5	15	

Este modelo difiere del empleado por Rodríguez *et al.* (2001) en la velocidad de la primera capa. En ese modelo la velocidad es de 2.1 km/s. Pero los resultados obtenidos con esa velocidad más baja producen errores mayores en los residuales de tiempo, y en general la velocidad resulta baja para el tipo de roca identificada en el primer kilómetro de profundidad. Es importante mencionar que el cambio de velocidad en la primera capa es independiente

de la distribución que hayan tenido las estaciones durante el trabajo realizado por Rodríguez *et al.* (2001). Después de hacer varias pruebas con diferentes velocidades para esta primera capa, se llegó a la conclusión de que los mejores resultados los proporcionaba una velocidad de 3.5 km/s.

Por otro lado, se revisó un modelo del vacimiento de Los Azufres propuesto por pudiendo Birckle et al. (2000),observarse que a 3 km de profundidad su modelo no requiere de un medio tan profundidades fracturado como а menores, donde ocurre la separación de las fases liquida gaseosa. y Complementando la información del mejor comportamiento en cuanto a residuales bajos con ese modelo de Birckle y colaboradores (2001), se llegó a la conclusión que el modelo de velocidades del recuadro resulta el mejor modelo de velocidades sísmicas para el campo geotérmico de Los Azufres (Figura 6).

Así, con ese modelo y mediante el programa HYPOCENTER, se localizaron los epicentros de los microsismos, cuyas magnitudes variaron



Fig. 6. Modelo de velocidades. (El modelo de circulación de fluidos fue tomado de Birckle et al., 2000.)

entre -0.1 y 1.8 grados Richter de acuerdo con la fórmula basada en la longitud de la coda. En la Figura 7, que corresponde a un área de 50 km de longitud por 25 de latitud aproximadamente, se observan esos microsismos, destacando en color amarillo los ocurridos en el año 2003 detectados por la red de Los Azufres, mientras que en color azul se señalan los detectados por Rodríguez y otros (2001). Los círculos amarillos parecen presentar un alineamiento importante de dirección NNE-SSW, y otro menos importante de dirección E-W.

La Figura 8 muestra la misma área pero ahora con los epicentros de los microsismos localizados entre mayo y noviembre de 2004 (círculos anaranjados) y en 2005 (círculos amarillos), así como de nuevo los localizados por Rodríguez *et al.* (2001) en círculos azules. En esta figura el alineamiento principal parece ser de dirección NNW-SSE, a diferencia de la anterior, e igualmente se observa un alineamiento menor de dirección E-W, que pasan al oeste de las estaciones Agua Escondida y El Chino.

La Figura 9 muestra la distribución a profundidad de los microsismos localizados por tres o más estaciones en los tres años de monitoreo. Podemos observar que ocurren enjambres de varios sismos a profundidades cercanas entre sí, en las diferentes etapas y en tiempos de ocurrencia cortos. En promedio, ocurren alrededor de 2.5 sismos vulcano-tectónicos dentro y en las inmediaciones de Los Azufres. Esta tasa de ocurrencia es similar en los tres años de registro.



Fig. 7. Epicentros de microsismos monitoreados en 2001 y 2003.



Algunos de los sismos de mayor magnitud (M ~1.5-1.7) se localizan hacia el noroeste del campo geotérmico, y los mayores se ubican en el poblado de Araró y al oeste del Cerro El Guangoche, al suroeste del campo. Evidentemente estos sismos no están relacionados con la actividad del campo geotérmico sino más bien con procesos tectónicos regionales. Por lo tanto, es posible concluir que hay una actividad sísmica de mayor magnitud fuera de los límites del campo geotérmico que en su interior o en sus cercanías.

6. Análisis espectral de sismos de vibración



Fig. 9. Profundidad de los sismos localizados por tres o más estaciones en los tres años de monitoreo.

Durante el análisis de los datos, se observaron también señales con características de vibración de tipo monocromático, que varían con el tiempo. En sistemas volcánicos estas señales están asociadas con la circulación de fluidos a profundidad, como pueden ser fluidos geotérmicos, magma, gas, o la combinación de ambas. En el caso del campo de Los Azufres, se asume que estas señales deben de estar asociadas a la circulación y movimiento de fluidos geotérmicos, ya sea en su proceso de extracción o de inyección. Mediante un análisis del movimiento de partícula en tres dimensiones es posible ubicar la dirección de la que vienen estas ondas, y por lo tanto ubicar la fuente que las genera.

Las figuras 10 y 11 presentan en su parte superior el sismograma de la señal y en su parte inferior un análisis espectral corrido. Este último análisis permite observar la variación de la frecuencia de vibración y su amplitud a lo largo del sismograma. Los colores hacia el rojo representan amplitudes grandes, mientras que hacia el azul corresponden a amplitudes bajas.

La Figura 10 corresponde a un evento sísmico registrado en la estación Agua Escondida que presenta dos paquetes de vibración a los 10 y 14 segundos del registro y que contienen las mayores amplitudes con frecuencias que varían alrededor de 23 Hz. La Figura 11 muestra una señal importante alrededor de los 42 segundos del registro sísmico. Debido a que esta señal tiene un comienzo claro, fue posible aplicar la técnica

del movimiento de partícula y determinar que la señal arriba a la estación de registro con un ángulo de 25° con respecto a la vertical y tomando en cuenta que el pozo más cercano se encuentra a 200 m de distancia, esto determinaría que el origen de esta señal se encuentra en el pozo a 428 m de profundidad. Se considera que este tipo de estudios podría ser importante e interesante para conocer la correlación entre la vibración producida por el pozo y el flujo que se inyecta en ese momento. Para llevar a cabo este análisis y para mejorar el monitoreo sísmico del campo, se sugiere mejorar los equipos sísmicos para tener datos continuos de alta calidad.



Fig. 10. Sismo de tipo armónico en Agua Escondida (23 Hz).



Fig. 11. Sismo armónico localizado a 200 m de distancia horizontal y 428 m bajo la superficie.

7. Conclusiones

- Es indispensable mejorar los equipos de monitoreo sísmico para optimizar la capacidad de detección y localización de vibraciones asociadas al movimiento de fluidos en el yacimiento y en general cualquier tipo de sismo generado dentro o fuera del arreglo de la red de Los Azufres.

- La capacidad de detección de la red de cinco estaciones sísmicas de Los Azufres mejoró notablemente a partir de que se instalaron tres estaciones más al sur, obteniendo un mejor control en la profundidad y pudiendo rebasarse la barrera de los 4 km de profundidad. Así, pudo registrarse un evento con una profundidad de 7 km.

- Durante los tres años de monitoreo se identificaron microsismos de tipo tectónico, sobre todo en la estación Agua Escondida y El Chino, varios telesismos y también fue posible identificar sismos relacionados con el flujo de vapor (armónicos) en el pozo Az-61 cercano a la estación de Agua Escondida.

- Fue posible identificar y localizar 117 sismos detectados por al menos tres estaciones. Sus magnitudes variaron de -0.1 a 1.8° Richter.

- El análisis de los sismos sugiere que hay tres tendencias de los sismos a alinearse en la zona suroeste de Los Azufres, principalmente, y son de dirección NNW-SSE, E-W y NNE-SSW.

- Las siete localizaciones epicentrales obtenidas por Rodríguez *et al.* (2001) en el año 2000, están localizadas al menos a 7 km al oeste de los epicentros detectados dentro de la zona de estaciones del presente estudio y en los estudios recientes no se ha presentado sismicidad en esos sitios.

8. Recomendaciones

- Es importante mencionar que los sismógrafos digitales DR-3016, los sensores S3000-EQ y los GPS son instrumentos que, debido a su antigüedad y las diversas modificaciones que han sufrido, presentan problemas irreparables o difíciles de resolver. Se recomienda reemplazarlos por instrumentos nuevos de detección sísmica con tecnología de punta. Con nuevos equipos se logrará disminuir el grado de error en la interpretación, mejorar la capacidad de detección de señales sísmicas, aumentar la precisión en la localización del origen de las vibraciones asociadas con el movimiento de fluidos del yacimiento, detectar telesismos lejanos que permitirán la evaluación a mayor profundidad del campo geotérmico, un control adecuado del tiempo, más facilidad en el manejo y procesado de los datos al retraer la información telemétricamente y operar la red en tiempo real.

- Se recomienda la adquisición de sismómetros triaxiales de banda ancha con registradores digitales que cuenten con sistemas de almacenamiento de al menos 4 GB y que cuenten con sistema de telemetría.

- Continuar expandiendo la red de Los Azufres con una estación más al norte y otra al oeste de Agua Escondida, que es donde se ha encontrado la mayor actividad sísmica y alineación de sismos, además de que se han observado registros relacionados con el movimiento de fluidos en el yacimiento. O bien reubicar estaciones para mejorar la capacidad de detección de microsismos en ese sector, lo cual permitirá un mejor control de los eventos con profundidades mayores a los 4 km.

Referencias

- Birckle, P., B. Merkel and E. Portugal (2000). Origin of reservoir fluids of the geothermal field at Los Azufres, Mexico. *Proc. World Geoth. Cong.*, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 2539-2544.
- Eberhart-Phillips, D., and D.H. Oppenheimer (1984). Induced seismicity in the Geyseres geothermal area, California. *Jour. Geoph. Res.*, 89, pp. 1191-1207.
- Jackson, D.D. (1972) Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data. Royal Astron. Soc. Geophys. Tour., 28, pp. 97-110.
- Lienert, B., E. Berg, and L.N. Frazer (1986). Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled and adaptively damped least squares. *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 76, pp. 771-783.
- Munguía, L., y V. Wong (1995). Estudio de sismicidad en la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, Baja California Sur. En: Medina-Martínez, F., L.A. Delgado-Argote y G. Suárez-Reynoso (Editores), La sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1). Unión Geofísica Mexicana, Monografía No.2, pp. 212-228.

- Phillips, S. W., T. Rutledge, L.S. House, and M.C. Fehler (2002). Induced microearhtquake patterns in hydrocarbon and geothermal reservoirs: Six case studies. *Pure and App. Geophys.*, 159, pp. 345-369.
- Rodríguez, M., J. Cuenca y G. Gómez (2001). Estudio de la Actividad Sísmica del Campo Geotérmico de los Azufres, Michoacán. Reporte elaborado para la CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.
- Scherbaum, F., and J. Johnson (1992). *Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis* (*PITSA*). IASPEI Software Library Volume 5, Seism. Soc. Am.
- Segall, P. (1989) Earthquakes triggered by fluid extraction. Geology, 17, pp. 942-946.
- Wiggins, R.A. (1972) The general linear inverse problem Implication of surface waves and free oscillations for the earth structure. *Rev. Geophys. and Space Phys.*, 10, pp. 251-285.

Análisis de la evolución productiva del pozo M-19A del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Marco H. Rodríguez-Rodríguez y Francisco Romero-Ríos

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto, Carretera Pascualitos-Pescaderos, km. 26.5, Mexicali, BC. Correo: <u>marco.rodriguez01@cfe.gob.mx</u>

Resumen

El pozo M-19A ha sido el más productivo del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, alcanzando una extracción de más de 40 millones de toneladas de fluido. Fue integrado a producción en febrero de 1975 y hasta junio de 2006 ha permanecido en producción en forma continua. Las mediciones mensuales de sus condiciones operativas y los análisis químicos e isotópicos del agua producida permiten identificar los procesos más significativos que han ocurrido a lo largo de esos más de 30 años en la zona donde se localiza el pozo. Se han identificado tres tipos de recarga dominantes que se presentan durante un periodo cercano a 10 años cada uno, los cuales son: a) una recarga de fluidos de menor temperatura al fluido explotado, aunque con un contenido químico de elementos conservativos e isotópico similar, b) una recarga de agua con fluidos de menor temperatura pero con agua química e isotópicamente diluida, y c) una recarga progresiva de agua de reinyección en frío, con una mayor concentración de cloruros así como de isótopos pesados. Los ritmos de explotación e inyección en la zona donde se localiza el pozo M-19A permiten especular que se puede tener una recuperación de la presión del yacimiento, lo cual se confirma con los cálculos de la presión del yacimiento utilizando datos de producción del pozo. La evolución de la presión en esa zona contrasta con la del resto del yacimiento, en donde se observa una mayor caída, en particular hacia las partes central y oriental del campo.

Palabras clave: Cerro Prieto, producción de fluidos, pozo M-19A, recarga de fluidos, química de fluidos, presión del yacimiento.

Analysis of productive evolution of well M-19A, Cerro Prieto geothermal field, BC

Abstract

Well M-19A has been the most productive in the Cerro Prieto field, producing around 40 million tons of fluid. The well went on line in February 1975 and was in continuous operation until June 2006. Monthly measurements for over 30 years of operating conditions and chemical and isotopic analyses of the fluids allow identification of the most significant processes occurring in the zone where the well is located. Three dominant recharge types have been identified, each lasting about 10 years. They are a) a recharge of fluids of lower temperature than the production fluids, even though the chemical and isotopic compositions; and c) a progressive recharge of lower-temperature fluids with diluted chemical and isotopic compositions; and c) a progressive recharge of reinjected water with a higher chloride concentration and heavy isotopic composition. The production and reinjection rates for over 30 years of production history in the M-19A well zone allow for speculation of a reservoir pressure recovery, which is confirmed with a calculation using production data from well M-19A. The evolution of the reservoir pressure in the zone contrasts with the rest of the reservoir, where a constant pressure drop is observed, particularly toward the central and eastern parts of the field.

Keywords: Cerro Prieto, fluid production, well M-19A, fluid recharge, fluid chemistry, reservoir pressure.

Introducción

La respuesta del yacimiento a la explotación se analiza, entre otras formas, por las historias del comportamiento productivo y características químicas del fluido producido por los pozos. En el campo de Cerro Prieto, los intervalos productores de cada pozo explotan diferentes estratos, permitiendo caracterizar las diversas zonas productivas del campo. A mediados de 2006, en Cerro Prieto se tenían cerca de 300 historias productivas (HP) de pozos, con un tiempo promedio de producción de 10 años por cada pozo, divididas por lo regular en varias etapas productivas. De las 300 HP disponibles hasta junio 2006, 165 corresponden a pozos que se encuentran en operación; el resto son de pozos que han sido cerrados para la producción, por ser irreparables económicamente, de pozos utilizados como inyectores, o de pozos que se encuentran en proceso de integración después de ser reparados o que están programados para reparación. Lo interesante de la HP del pozo M-19A es que presenta el mayor historial productivo del campo, reflejando en forma general la respuesta del yacimiento a la explotación en la zona donde se ubica este pozo.



Fig. 1. Ubicación del pozo M-19A en Cerro Prieto.

A continuación se analizan las condiciones geológicas en la zona donde se perforó el pozo M-19A. Posteriormente se presenta la evolución productiva y química del pozo, lo que permite identificar tres etapas con características de recarga diferentes. Con los datos de producción se reproduce la evolución de la presión del yacimiento, la cual parece presentar una probable recuperación en la zona, fundamentada en un balance de masa en esa zona del pozo. Posteriormente se compara el comportamiento del pozo M-19A con el de otros pozos de otras zonas del área de Cerro Prieto 1 (CP1), lo que permite resaltar las particularidades de cada zona.

Antecedentes

El pozo M-19A se localiza en la porción noroccidental de CP1, en la zona norte somera denominada alfa norte (Rodríguez *et al.*, 2000), como se indica en la Figura 1. El pozo fue construido entre el 8 de febrero y el 5 de abril de 1972, alcanzando una profundidad total de 1488 m, en agujero de 0.270 m (10 5/8") diámetro. El pozo quedó con tubería ranurada de 0.1936 m (7 5/8") de diámetro, de los 1054 m a los 1447 m de profundidad.

El pozo fue reparado del 28 de octubre al 6 de noviembre de 1973, al considerarse que por debajo de los 1300 m de profundidad podría haber una invasión de fluidos de menor temperatura. Por ello se colocó un tapón de cemento al fondo, cuya cima quedó a 1263 m de profundidad, dejando un intervalo para producir de 209 m de longitud.

De acuerdo con la columna litoestratigráfica descrita en el pozo M-19A, desde la superficie hasta 705 m se cortó la unidad de sedimentos clásticos no consolidados, consistentes en arcillas de color café claro, limos,

arenas finas a gruesas, gravas, fragmentos de arenisca mal cementada y restos de madera fósil. Entre los 705 y los 834 m de profundidad se encuentra el paquete de lutita café, considerada la capa sello del yacimiento, la cual descansa sobre la unidad de lutita gris, que consiste de lutitas de color gris oscuro y claro bien cementada, con intercalaciones de areniscas blanquecinas cuarcíticas con cementante calcáreo y presencia de pirita diseminada. Esta es la unidad productora, que hospeda a los fluidos geotérmicos, y en este pozo continúa hasta la profundidad total perforada. En las areniscas que la componen no se identificó la típica asociación mineralógica de sílice y epidota asociada con la zona productora en otras partes del campo. Como se sabe, la unidad de lutita gris descansa sobre el basamento granítico, que en la zona de CP1 donde se perforó el pozo M-19A se encuentra alrededor de los 3000 m de profundidad.

Historia del comportamiento productivo

El pozo M-19A fue integrado al sistema de producción en febrero de 1975 y ha permanecido en producción continua por lo menos hasta la fecha en que se escribió este trabajo (agosto de 2006), por lo que no ha dejado de producir en 31 años.

En la Figura 2 presenta el se comportamiento histórico de la concentración de cloruros (Cl), la composición isotópica del oxígeno-18 y del deuterio. así como las temperaturas obtenidas con los geotermómetros de NaKCa y SiO₂. Se puede observar que de 1975 a 1985 la concentración de Cl se mantuvo en un rango estable de 9000 a 10,000 ppm, declinando en esa década alrededor de 93 ppm/año. De 1985 a 1995 ocurre una dilución, al bajar la concentración de Cl de 9000 a 6000 ppm, con la excepción de un incremento puntual en 1992 debido al arribo de agua de invección proveniente del pozo invector 104, invección que fue suspendida ese mismo año. El ritmo de dilución de Cl en esta segunda década fue de 264 ppm/año. De 1995 a 2005 se observa un nuevo incremento de Cl de 6000 a 11,000 ppm, lo cual se debe a la gradual invasión de fluidos reinvectados de la laguna de



Fig. 2. Comportamiento del pozo M-19A. (a) Evolución de cloruros a condiciones de yacimiento; (b) evolución isotópica; (c) evolución de la temperatura geotermométrica.

evaporación. Este ritmo de incremento en cloruros es de 474 ppm/año (Fig. 2a).

De 1977 a 1985 la composición isotópica del oxígeno-18 varió de -8.21 a -8.75 ‰, manteniéndose dentro del rango (-6.5 a -9.5 ‰) determinado para las aguas geotérmicas del yacimiento de Cerro Prieto (Pérez, 2000), al igual que el deuterio, que en el mismo periodo varió de -93.2 a -96.4 ‰ (Fig. 2b), dentro del rango para aguas geotérmicas (-90 a -100 ‰).

De 1985 a 1994 el oxígeno-18 disminuyó su composición de -8.75 a -10.6 ‰, indicando la recarga de aguas isotópicamente ligeras, las cuales son de menor temperatura. El deuterio para ese mismo periodo, muestra una variación de -96.4 a -99.1 ‰, pero se mantiene dentro del rango de las aguas geotérmicas. Como los valores del oxígeno-18 sí salieron del rango para las aguas geotérmicas, puede concluirse que el oxigeno-18 parece ser más sensible y determinante que el deuterio para identificar las zonas con recarga de fluidos de menor temperatura.

De 1995 a 2005 se presenta un incremento en la composición de isótopos pesados por la presencia del agua de reinyección en la zona del pozo. Así, el oxigeno-18 se incrementó de -10.6 a -8.6 ‰, retornando a valores dentro del rango de aguas geotérmicas, mientras que el deuterio aumentó en este periodo de -99.1 a -89 ‰, logrando rebasar el límite del rango para aguas geotérmicas del yacimiento. Esto indica que para identificar la presencia del agua inyectada de la laguna de evaporación con isótopos pesados, el deuterio es el que proporciona una mejor respuesta.

En general, se puede observar que el comportamiento de los cloruros y de los isótopos es similar, ya que identifican una primera etapa de estabilidad de valores, seguida de una etapa de dilución para continuar posteriormente con una etapa de enriquecimiento, con una duración aproximada de 10 años por etapa.

La temperatura obtenida con los geotermómetros de NaKCa y de SiO₂ (T-NaKCa y T- SiO₂, respectivamente) presenta valores de 300° C durante 1975, declinando gradualmente a un ritmo de 3.5°



Fig. 3. Registros de temperatura en el pozo M-19A.

C/año hasta 1991 cuando alcanza valores de 250° C. De 1991 a 2004 el ritmo de declinación disminuye a 1.5° C/año, alcanzando valores aproximados de 240° C. Se tienen algunos datos con temperatura de 260° C, por ejemplo durante el año 2005, pero esto puede deberse a la invasión de agua de inyección proveniente de la laguna de evaporación, la cual aunque está a temperatura ambiente (20° C), al aplicar el geotermómetro llega a valores superiores a 280° C. Desde el año 1986 la T-SiO₂ se vuelve mayor que la T-NaKCa, lo que indica un proceso conocido como barrido de calor (Truesdell *et al.*, 1989).

En la Figura 3 se presentan registros de temperatura corridos en el pozo M-19A en 1973, 1975 y 2004. Se observa una buena correspondencia con las temperaturas geotermométricas mencionadas (Fig. 2b). Así, los registros de 1973, con el pozo sin fluir, y de 1975, con el pozo fluyendo, indican temperaturas de 300° C en la zona del intervalo ranurado. Por su parte, el registro de 2004, con el pozo fluyendo, revela una temperatura de 260° C en la misma zona del intervalo productor. Todas estas temperaturas coinciden calculadas con las con los geotermómetros mencionados.

El flujo de vapor y líquido a presión de separación, así como la entalpía, presión de cabezal y el diámetro del orificio de la placa de producción (DOPP), se muestran en la Figura 4 (a), (b) y (c), respectivamente.

Entre 1975 y 1985 el flujo másico se mantiene estable, con valores promedio de 56 t/h para el vapor y de 130 t/h para el líquido, pero para el siguiente periodo de 1985 a 1995 presenta una declinación de vapor de 3.6

t/h/año. En el periodo de 1995 a 2004 la producción de vapor se presenta estable, incluso con una muy ligera recuperación de 0.6 t/h/año, como se muestra en la Figura 4a.

La entalpía de producción se mantiene con un valor dominante de 1300 kJ/kg hasta 1993, aunque durante algunos años presenta incrementos de hasta 1500 kJ/kg (1975 y 1976) y 1400 kJ/kg (entre 1988 y 1992). De 1994 a 2006 la entalpía promedio se mantiene en el orden de los 1100 kJ/kg, con algunos altibajos en el rango de 1000 a 1200 kJ/kg (Fig. 4b).

La historia de la presión de cabezal se puede explicar en parte por los cambios en los DOPP. De 1975 a mediados de 1988 la presión de cabezal se mantiene estable, con un promedio de 7.3 bar, mientras que la presión de separación fue de 6.9 bars y el DOPP de 20.3 cm (8"). De mediados de 1988 a principios de 1993, el DOPP se mantuvo en 12.7 cm (5"), y la presión de cabezal declinó de 12 a 8 bars (Fig. 4c).

En 1993 se reduce el DOPP a 8.89 cm (3.5") y se mantiene así hasta mediados de 2006. La presión de cabezal en 1993 se incrementó hasta 16 bars, declinando gradualmente a 14 bars en 1995 y manteniéndose así hasta el año 2000, cuando presenta un incremento gradual hasta los 17 bars para conservarse así hasta 2004, presentando posteriormente ligeras variaciones. Los últimos cambios de presión ocurrieron sin haber cambio en el DOPP (Fig. 4c).

Uno de los puntos más sobresalientes que surgen al analizar la historia productiva del pozo, es su



Fig. 4. Evolución de la producción del pozo M-19A. (a) Flujo de vapor y líquido, a presión de separación, (b) Entalpía de producción y c)
Presión de cabezal y Diámetro del Orificio de la Placa de Producción (DOPP).

estabilidad en el flujo másico de vapor y agua, así como la recuperación de la presión de cabezal, a pesar de que el pozo ha recibido recarga de fluidos de menor temperatura, como lo indican los geotermómetros, así como de haber recibido fluidos diluidos durante 10 años y de reinyección en los siguientes 10 años, según lo indicado por la evolución de los cloruros y la isotopía (Fig. 2). Pero, como un reflejo de este tipo de recarga, se ha observado la declinación, ya mencionada, en la entalpía de producción (Fig. 4b).

Lo que puede explicar la estabilidad en la producción del pozo M-19A puede ser una recuperación de la presión del yacimiento en la zona del pozo, por lo que en la siguiente sección se hace un cálculo de la presión del yacimiento en esa zona.

Calculo de la presión del yacimiento

Para realizar este cálculo se tomaron en cuenta las condiciones de flujo másico (vapor más agua), la entalpía de producción y la presión de cabezal del pozo M-19A, así como su geometría, pero no se consideró ninguna reducción en el diámetro de las tuberías del pozo por incrustación. En total se elaboraron 15 cálculos de la
presión del fondo fluyendo (Pff), representativos de las condiciones prevalecientes a lo largo de su historia productiva, como se indica en la Figura 5 (a), (b) y (c).



Fig. 5. Historia productiva del pozo M-19A. (a) Producción de mezcla; (b) Entalpía; (c) Presión de cabezal; (d) Presión de yacimiento para diferentes índices de productividad (IP) de 1.5,
2, 3, 5 y 10, así como presión de fondo fluyendo (Pff) en cruces de color azul.

Los resultados de la evolución de la Pff se señalan con X de color azul en la Figura 5d. Ahí se puede observar que la Pff se mantuvo estable en alrededor de 42 bars entre 1975 y 1993, valor que está muy por abajo de la presión de yacimiento para esa zona en esos tiempos: la presión de yacimiento a 1263 m de profundidad estaba en el rango de 140 a 100 bars. El valor para Pff en ese periodo está incluso por debajo de la presión de saturación de líquido a la temperatura inicialmente medida por registros de fondo, ya que a 300° C la presión de saturación de líquido es de 85.8 bars.

De lo anterior se desprende que en ese periodo productivo se tenían dos fases en el yacimiento. De acuerdo a los cálculos, la Fracción de Vapor del pozo en el fondo fluyendo (FVff) presentó variaciones en el rango de 0.20 a 0.12 en el periodo de 1975 a 1993. De 1993 a 1995 la FVff fue disminuyendo hasta haber una sola fase líquida, y mantenerse en esas condiciones hasta 2006.

Habiendo obtenido la Pff, se procedió al cálculo de la presión de yacimiento (Py) empleando diferentes índices de productividad (IP) y utilizando la correlación lineal, así como un flujo horizontal, el cual es característico en esta zona del yacimiento (Rodríguez *et al.*, 2000), en contraste con otras zonas del yacimiento donde la permeabilidad vertical juega un papel determinante (Rodríguez *et al.*, 2006). Lo anterior se debe a que se ha observado que el IP ajustado a pozos en fase líquida por lo regular alcanza valores de hasta 10 t/h/bar, mientras que en pozos con alta fracción de vapor llega a valores de hasta 1 t/h/bar. Así, para reproducir la Py

en 1975 se puede considerar el IP de 2 t/h/bar, que es cuando se tiene la mayor FVff. De 1980 a 1993, la FVff promedio fue de 0.12, por lo que un IP de 3 se considera aceptable. Finalmente, de 1995 a 2006 el IP puede ser entre 5 y 10. El resultado sobresaliente en este ejercicio es observar que de 1995 a 2006, independientemente del IP utilizado, se presenta un incremento de la Py cercano a 30 bars.

Es importante señalar que en los pocos casos en donde ha ocurrido un incremento en la presión de cabezal a lo largo de varios años de historia productiva sin tener cambios en los DOPP, ello se ha debido a incrementos en la entalpía en zonas de alta permeabilidad vertical, como el caso reportado del pozo NL-1 (Rodríguez, 2003).



Fig. 6. Área considerada para el balance de masa en la zona del pozo M-19A, y localización de los pozos referidos en el texto.

La variación de la presión de un vacimiento geotérmico depende, entre otras cosas, del balance entre la masa que entra y sale del sistema, además de la variación de la fracción de vapor y la temperatura del fluido. Por lo tanto, en esta sección se incluye un balance entre los gastos medidos de explotación y los de la reinvección, para la zona que se indica en la Figura 6. En este ejercicio, para los gastos de explotación se consideró la producción de los pozos tanto someros como profundos de la zona norte de CP1, mientras que para los gastos reinvectados se tomaron en cuenta únicamente los nueve pozos inyectores localizados hacia el noroeste y en la laguna de evaporación, que se indican en la mencionada figura.

Los gastos producidos y reinyectados de los pozos se presentan en la Figura 7. En ella se puede observar que la explotación en esa zona empezó en 1973, alcanzando en 1975 cerca de 2000 t/h y se incrementó hasta 2500 t/h durante 1978. A partir de

entonces empieza a declinar para llegar a 1500 t/h en 1990, para posteriormente aumentar hasta unas 1800 t/h en 1995 y volver a declinar gradualmente hasta reducirse a cerca de 500 t/h en el año 2006.

Por su parte, el flujo másico de agua inyectada empezó en 1990, aunque se suspendió en algunos periodos durante 1991 y 1992. En 1993 la inyección en la zona llegó a cerca de 1000 t/h, manteniéndose con altibajos con un gasto promedio de 1260 t/h para el periodo de 1993 a 1998, y de 1180 t/h para el periodo de 1999 a julio de 2006. Como se puede observar en la Figura 7, a partir de 1998 se tuvo en la zona analizada un mayor gasto de inyección que el gasto extraído.



Fig. 7. Flujo másico de masa extraída y reinyectada en los pozos indicados en la Figura 6.

La zona analizada tiene una superficie

de 1.64 km². En su subsuelo puede asumirse una porosidad global del orden del 10% (0.1), y la densidad del fluido ahí contenido es de 712 kg/m³ en promedio, ya que es la densidad que corresponde al agua líquida saturada a 300° C. Tomando en cuenta, además, que el fluido extraído acumulado hasta junio de 2006 en la zona analizada es de 438 millones de toneladas, la caída teórica del nivel habría sido de 3750 metros si no existiera ninguna recarga hacia la zona. Sin embargo, el nivel medio de esa zona del yacimiento en 2006 se mantiene en un rango de entre 200 y 500 m. Por lo tanto, es evidente que sí ha habido recarga a través de las fronteras de la zona analizada, y de que esta recarga ha sido de cuando menos 397 millones de toneladas hasta la fecha del análisis (junio de 2006).

Ahora bien, si tanto la recarga natural como la artificial (el agua inyectada) que recibe la zona es mayor al volumen másico extraído, es posible que en esa zona se esté presentando una recuperación de la presión de yacimiento. Esta recuperación se podría ver reflejada en los pozos productores siempre y cuando la entalpía del fluido en el yacimiento no disminuyera significativamente. Al parecer este ha sido el caso del pozo M-19A, a diferencia de la mayor parte de los pozos de la zona. Esos demás pozos, particularmente los de mayor profundidad, han sufrido una sustancial disminución en la entalpía de sus fluidos, lo que ha provocado que gradualmente vayan dejando de producir.

Por otro lado, la producción másica de la zona analizada hacia mediados de 2006 es, como se indicó antes, de unas 500 t/h (ver Fig. 7). De acuerdo con cálculos basados en las concentraciones de cloruros de los pozos productores e inyectores, aproximadamente la mitad de esas 500 t/h que se producen en la zona corresponde a agua de inyección. Si se considera que en el margen noroeste de la laguna se inyecta un total de 750 t/h de agua, puede estimarse que, descontando las 250 t/h que se extraen en la zona analizada, las restantes 500 t/h de agua inyectada se están desplazando hacia zonas productoras localizadas hacia el oriente de la misma zona analizada, de acuerdo con el flujo predominante que se ha determinado para la zona norte de CP1 (Rodríguez *et al.*, 2000).



Comparativo del comportamiento del pozo M-19A con pozos de otras zonas de CP1



Con el objeto de resaltar el comportamiento del pozo M-19A, se compara su historial de concentración de cloruros y la evolución de la geotermometría de NaKCa con las de otros cuatro pozos del área de CP1 (pozos M-10A, M-50, M-84 y E-7) cuya ubicación puede verse en la Figura 6. La comparación se grafica en la Figura 8.

En la Figura 8a se observa que cuando cada pozo empieza a producir la concentración de cloruros de sus fluidos se mantiene en el rango de 8000 a 12000 ppm, que es el rango definido para aguas geotérmicas antes de la explotación del campo. El pozo con una mayor dilución de Cl en su inicio es el pozo M-50, localizado al sur de CP1. La concentración inicial de Cl en los pozos M-84 y E-7 es mayor a la del pozo M-19A, pero ambos presentan una dilución más pronunciada con el paso del tiempo, llegando a valores de hasta 4000 ppm, lo cual contrasta con la mayor estabilidad del M-

19A. Los fluidos del pozo M-10A, en cambio, mantienen sus concentraciones de cloruros por arriba de las 8000 ppm.

En relación a la temperatura calculada con el geotermómetro de NaKCa (Figura 8b), se puede observar que las temperaturas iniciales de todos los otros pozos fueron superiores a la del pozo M-19A, llegando a los 340° C en los pozos M-10A y M-84 y a los 320° C en el E-7, y coincidiendo en todos los casos con las respectivas temperaturas medidas por registros de fondo. Sin embargo, en todos ellos se observa un

Conviene agregar que los cuatro pozos comparados han dejado de fluir en las diferentes fechas indicadas en la Figura 8.

El contraste en el comportamiento de cada pozo se debe a varios factores, entre los que están sin duda su localización y terminación. Estos factores afectan la cantidad y calidad de la recarga, por ejemplo la temperatura del agua de recarga. Por ello se puede decir que la localización y terminación del pozo M-19A han favorecido una recarga bastante continua, aunque haya sido de baja temperatura, lo que a su vez le ha permitido a este pozo mantener su producción por más de 30 años, en contraste con la gran mayoría de los pozos de CP1.

Conclusiones

El análisis de la historia de producción del pozo M-19A indica que el pozo ha recibido diferentes tipos de recarga de fluido durante sus más de 30 años de producción ininterrumpida. Es posible dividir esa historia en tres periodos de una década cada uno, en el primero de los cuales, de 1975 a 1985, el pozo presentó un gran estabilidad productiva y valores constantes en la concentración de cloruros y de isótopos pesados en los fluidos producidos. En el segundo periodo, de 1985 a 1995, se observa una clara dilución de cloruros y de isótopos pesados, así como una declinación en la producción de fluidos. Finalmente, en el tercer periodo de 1995 a 2006 hay evidencias de una recarga con mezcla de agua de inyección.

La recarga de fluidos en los alrededores del pozo tiene temperaturas relativamente bajas, lo que ha provocado una disminución en la entalpía y en la temperatura del fluido producido. Sin embargo, la declinación no ha sido tan marcada como en la gran mayoría de los pozos de CP1. La recarga, aunada a una disminución en el ritmo de explotación en la zona, ha permitido una recuperación de la presión de yacimiento, la cual se manifiesta en el pozo M-19A desde 1995 en forma de una mayor estabilidad productiva y de un incremento en la presión de cabezal.

Por otra parte, este trabajo hace patente la importancia de analizar en forma multidisciplinaria el comportamiento de un pozo, así como de tratar de comprender el comportamiento global del entorno de la zona, para poder correlacionar adecuadamente las observaciones con sus causas reales.

Agradecimientos

Se agradece al personal del Departamento de Yacimientos de la Residencia de Estudios de Cerro Prieto por mantener una continua discusión sobre el comportamiento del yacimiento, lo que ha permitido una mejor comprensión de los procesos que ocurren en el mismo a fin de lograr una explotación más eficiente y sustentable.

Referencias

Pérez Hernández, A. (2000) Caracterización general de los procesos en el yacimiento utilizando variables geoquímicas y termodinámicas básicas. Reporte interno de la CFE No. RE-031/00. Inédito.

- Rodríguez R., M.H., H. Gutiérrez-Puente y J. de León-Vivar (2000). Updated fluid flow model for the CP1 area of Cerro Prieto. *Proceedings of the 25th Geothermal Reservoir Workshop*, Stanford, California, pp. 388-397.
- Rodríguez R., M.H. (2003) Response of the Northeastern Cerro Prieto Wells to Exploitation. *Transactions* of the Geothermal Resources Council, Vol. 27, pp. 779-784.
- Rodríguez R., M.H., J.S. de León Vivar, A. Pérez Hernández y M. Corona Ruiz (2006). Relación entre la terminación de pozos y la producción de vapor para el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, Vol. 19, No. 1, pp. 41-51.
- Truesdell, A.H., B. Terrazas, L. Hernández, C.J. Janik, J.L. Quijano, and R. Tovar (1989). The response of the Cerro Prieto reservoir to exploitation as indicated by fluid geochemistry. *Proc. CFE-DOE Symp. in Geothermal Energy*, DOE CONF 8904129, pp. 123-132.

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.

Medio ambiente, geotermia y toma de conciencia

Sergio Mercado¹, Víctor M. Arellano² y Rosa María Barragán²

Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Energías Alternas ¹Gerencia de Calidad, Ambiente y Seguridad, ²Gerencia de Geotermia Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor., Correo: <u>smercado@iie.org.mx</u>

Resumen

La demanda de energía en el mundo es cada vez mayor a medida que la población aumenta y la sociedad busca mejores niveles de vida. El uso de la energía continúa creciendo en todo el mundo y se espera que su consumo se incremente sustancialmente en las próximas décadas. Actualmente a nivel mundial se consumen cada año más de 60 mil millones de barriles de petróleo equivalente (BPE) para atender las demandas energéticas, principalmente para la generación de energía eléctrica. Esta energía es la que proporciona una gran versatilidad en cuanto a su uso, pero su proceso de generación a partir de combustibles fósiles es poco eficiente y conlleva impactos negativos al medio ambiente. Además, las reservas de combustibles fósiles son finitas: cuanto más se utilicen más rápido se agotarán. En este contexto, la energía geotérmica es una energía renovable, limpia, tanto para generar electricidad como para otros usos, llamados directos. En México su uso comercial es un éxito, teniendo una capacidad instalada de 953 MWe, y es bien conocido que abundan los recursos geotérmicos de moderada y baja temperatura. Como ésta, se tienen otras fuentes de energía renovables y que no causan impacto ambiental, como la solar y la eólica, pero no se ha tomado conciencia plena de que debemos aprovecharlas al máximo para apoyar así un desarrollo sustentable.

Palabras clave: Geotermia mundial, geotermia en México, medio ambiente, cambio climático, energías renovables.

Introducción

La combinación de crecimiento demográfico y desarrollo económico, que incluye la industrialización en el mundo entero, significa que el consumo mundial de energía continuará aumentando. Debido a estas tendencias cada día se hace un uso más intensivo de la energía fósil para producir energía eléctrica y combustibles para el transporte. En el escenario a corto, mediano y largo plazo, hay un uso irracional de petróleo, gas natural y carbón, que pueden satisfacer respectivamente la demanda de los próximos 40, 60 y 230 años.

A manera de ejemplo, en las dos próximas décadas la India proyecta triplicar, y China duplicar, la utilización de carbón para consumo de electricidad, seguidos por varios países más. Esto significa que la contaminación del medio ambiente seguirá en aumento en todos los países del mundo, incluida la emisión de gases de efecto invernadero. En este rubro, los estudios sobre los gases de efecto invernadero (GEI), que es una de las mayores preocupaciones actuales y un indicador de contaminación global, no indican la menor estabilización en las emisiones en los próximos 40 años, aún con medidas estrictas de reducción.

Se quiera o no debemos abocarnos al uso intensivo de energías renovables, y esto sólo ocurrirá si los convencidos logramos que se tome conciencia plena de que si no se hace continuaremos con la destrucción acelerada de nuestro planeta. Afortunadamente cada día se aprovechan en mayor número de países las mencionadas energías renovables, lo cual se hizo patente, por ejemplo, en el pasado World Geothermal

Congress 2005, en el que se contó con la participación de 71 países, que expusieron datos sobre el uso de estas energías.

El medio ambiente

La normativa ISO 14000 lo define como "entorno en el cual una organización opera, incluidos el aire, el agua, el suelo, los recursos naturales, la flora, la fauna, los seres humanos y sus interacciones".

Para lo que vamos a tratar, una organización puede ser desde una familia hasta la más grande empresa o institución. Todos, incluso como individuos, tenemos nuestro entorno, y todos estamos involucrados en la protección o afectación al medio ambiente. La humanidad entera, que crece también en forma alarmante (Fig. 1), afecta necesariamente al ambiente, para su desarrollo o para mejorar su calidad de vida.



Fig. 1. Crecimiento de la población mundial (PNUMA, 2000)

Nos transportamos en vehículos contaminantes, dependemos de la electricidad y utilizamos o consumimos agua, alimentos, materiales, artículos o equipos que directa o indirectamente son grandes demandantes de energía, la cual proviene principalmente de los combustibles fósiles.

Las Naciones Unidas han señalado en diversos foros que el desmedido crecimiento poblacional influye significativamente en el medio ambiente y es uno de los factores más importantes a considerar para el desarrollo sustentable (UN-DESA, 2001).

Se tiene así que, aunado al aumento de la población, cada día se incrementa el uso de los combustibles fósiles, principalmente para el transporte y la generación de electricidad. En la Tabla 1 se puede apreciar este incremento en el consumo, que en menos de un cuarto de siglo, de 1980 a 2003, fue de un 23%, estimándose que de 2003 a 2025 el consumo aumentará en más de un 50%.

Esto ocurrió en las últimas dos décadas del siglo pasado y sigue ocurriendo en los primeros años del presente siglo, que es cuando se supone que ya se tiene conocimiento pleno del deterioro ambiental que se está

ocasionando a los ecosistemas por el uso irracional y cada vez más intensivo de los combustibles fósiles. Además, existe el compromiso de los países desarrollados de disminuir su consumo (PK). Sin embargo, como se ve en la Tabla 1, la tendencia mundial es a aumentar más del 50% en tan sólo cuatro lustros. Actualmente, el consumo de combustibles fósiles provoca la emisión a la atmósfera de 25 mil millones de toneladas por año de CO_2 , además de otros contaminantes.

	1980	2001	2002	2003	2025
Petróleo	23.0	26.8	26.5	27.4	
Gas Natural	9.4	16.2	16.5	17.0	
Carbón	12.3	16.7	16.7	17.2	
Total	49.7	59.7	59.7	61.6	88.5*

* Estimado

Tabla 1. Consumo mundial de combustibles fósiles por año (miles de millones de barriles de petróleoequivalente) (EIA, 2006)

Como se aprecia en la Figura 2, el consumo mundial de combustibles fósiles empezará a declinar significativamente sólo hasta el año 2040, en el escenario planteado por *The Energy Review* (2004). Esperemos que no sea demasiado tarde y que no hayamos deteriorado el medio ambiente en forma irreversible.



Sin embargo, actualmente se está afectando de manera intensa el medio ambiente y como toda causa-efecto, la pérdida de biodiversidad es ya alarmante.

Además del uso desmedido de los combustibles fósiles, las pérdidas de biodiversidad están ocurriendo también por otras causas propias de las actividades humanas, de manera significativa desde hace tres siglos y muy acentuadamente en las últimas décadas. Entre las causas principales están el cambio de ecosistemas naturales por zonas agrícolas, y la contaminación del agua, el suelo y el aire por desechos municipales y desechos industriales.

Sobre el aspecto agrícola, en el año 1700 se tenían unos cuatro millones de km² dedicados a la agricultura, pero para 1990 la superficie había aumentando a 18 millones de km². En el mismo lapso, la superficie de pastizales para cría de ganado se incrementó de 5 a 31 millones de km², principalmente a expensas de los bosques (FHO, 2004). Si se recuerda que la superficie terrestre es de 511 millones de km², se podrá ver que para 1990 casi el 10% de esa superficie se ocupaba para agricultura y cría de ganado. Adicionalmente, se consumían para esas actividades 1400 km³ de agua dulce, lo que representaba el 78% del consumo total de agua (IFPRI, 2002). Considérese, además, que operaban en el mundo unos 70 millones de tractores y se esparcían cientos de millones de toneladas de fertilizantes y pesticidas, que operan o se producen con energía fósil.

Se estima que la degradación de suelos actual es de 1200 millones de hectáreas de tierras en el mundo, que antes fueron productivas. Entre las causas de esa degradación están la deforestación y el pastoreo excesivo, que contribuyen con un tercio cada una, mientras que la mayor parte del resto se debe principalmente a la mala gestión de las tierras de labranza (FAO, 2000).

Sabemos de desastres industriales que han contaminado el ambiente y causado miles de muertes y afectado a millones de personas, ciudades, mares, animales, bosques y tierras de cultivo. Pero también hay actividades industriales cotidianas que con el pretexto del desarrollo acumulan una contaminación excesiva. Un ejemplo de esto es lo ocurrido en la ciudad industrial de Copsa, Rumania, en donde dos fundidoras estuvieron enviando a la atmósfera 67 mil toneladas anuales de SO₂, 500 de plomo, 400 de zinc y 4 de cadmio, durante varias décadas. El resultado es que afectaron 181 mil hectáreas de la ciudad, 150 mil de tipo agrícola y 31 mil de bosques. Ambas industrias fueron cerradas en 1993, pero se estima que sus efectos devastadores durarán hasta después del año 2020 (UNDP, 2002).

Entre los principales impactos al ambiente y a la biodiversidad están los siguientes:

- Destrucción de ecosistemas. El calentamiento global ha cambiado ampliamente el clima en diversas regiones y afectado a un gran número de países, provocando sequías e inundaciones cada vez más graves, de elevado costo económico y social. En comunicación reciente, el presidente del WWI, Christopher Flavin, mencionó: "En 12 mil desastres registrados relacionados con el clima hasta 1980, ocurrieron 618 mil 200 muertes y pérdidas económicas totales de 1.3 mil millones de USD. En la década de 1980, el promedio anual de pérdidas económicas fue de 26 mil millones de USD. En el 2004 la cifra fue de 104 mil millones, y en el 2005, tan sólo por el huracán Katrina se reportaron 1123 muertes y se estiman pérdidas de hasta 200 mil millones de USD" (WWI, 2005).

- Falta de alimento para muchas familias pobres de países en desarrollo que se alimentan en un 50% de plantas y animales silvestres y que suman miles de millones de personas.

- Falta de plantas silvestres para fabricar medicamentos, poniendo en riesgo la salud de la humanidad. El 50% de 150 medicamentos clave se extraen de plantas silvestres.

- Disminución de cardúmenes marinos. El 16% de la alimentación de la humanidad proviene de la pesca en mar abierto.

- Falta de plantas para consumo como energía. El 15 % de la energía consumida a nivel mundial se deriva de la quema de materiales derivados de las plantas. En algunos países no desarrollados significa hasta el 90% de la energía consumida.

- Disminución del rendimiento por hectárea cultivada debido a la lluvia ácida.

- Más del 50% de los bosques perdidos a nivel mundial.
- Pérdida de biodiversidad anual estimada en 25 mil especies.

Lo que actualmente es más significativo, llama mucho la atención y causa muchas polémicas, es la elevada emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Fig. 3), siendo el principal de estos el CO_2 del cual se emiten del orden de 25 mil millones de toneladas por año. Esto debe considerarse como un indicador, porque ciertamente los GEI provocan elevada contaminación atmosférica, pero hay otros procesos en la cadena de explotación de los combustibles fósiles que son tanto o mas graves, y que afectan intensamente el medio ambiente.



En la Figura 3 se observa un continuo aumento en la emisión de CO_2 , una parte del cual (la mitad aproximadamente) se acumula en la atmósfera (área azul) e incrementa el efecto invernadero, y otra parte es absorbida por fotosíntesis por el plancton oceánico y la vegetación terrestre (área verde), aumentando así la biomasa terrestre.

En México, cálculos económicos del INEGI estiman que la pérdida de capital natural debido a daños al ambiente equivale cada año a 10.6% del PIB (1800 millones de dólares en pérdidas). Entre las causas de esa pérdida sobresalen, en el caso del agua, que el 78% de las aguas residuales municipales y el 85% de las industriales se vierten a los cuerpos de agua sin recibir tratamiento alguno; que las redes municipales de agua potable pierden hasta el 50% por fugas en la red de distribución y que 55% del agua de riego agrícola se pierde por evaporación e infiltración. Todo ello ha conducido a que el 15 % de los acuíferos se encuentren sobreexplotados, mientras que 12 millones de mexicanos aún carecen de agua potable y 24 millones no tienen alcantarillado.

Además del desperdicio, otra causa de la escasez de agua en México es la pérdida de bosques, la cual altera el ciclo de lluvias y su infiltración para la recarga de los mantos freáticos. Cada año se deforestan alrededor de 600 mil hectáreas, además de que el 40% de los bosques y selvas están en malas condiciones de conservación o presentan plagas. La tala ilegal y el saqueo de flora y fauna silvestre alcanzan proporciones críticas en 382 áreas (SEMARNAT, 2005).

La energía geotérmica

Esta energía existe en la mayor parte de los países de la Tierra. Es una energía renovable, noble, limpia y fácil de explotar. Actualmente su uso más importante es para generar electricidad, principalmente de los yacimientos geotérmicos de elevada entalpía. Sin embargo, este tipo de yacimientos son relativamente pocos

al compararlos con los de baja entalpía, por lo que en la mayoría de los países se han venido utilizando cada vez más, principalmente, en bombas de calor, calefacción y usos diversos.

En la Figura 4 Stefansson (2005) relaciona la abundancia de yacimientos geotérmicos con su temperatura, pudiéndose ver que los yacimientos de entalpía, con temperaturas baja menores de 130° C, se encuentran en mayor número. Por ejemplo, por cada vacimiento de 250° C hay más de cinco de 100° C y tres y medio de 150° C. Por tanto, los yacimientos de baja temperatura pueden ser explotados en muchos países del mundo.

La importancia de los yacimientos de alta entalpía estriba en que se utilizan principalmente para la generación de electricidad según Stefansson v, (2005), representan el 32% de los yacimientos de más de 130º C.

2 50 100 150 200 0

Fig. 4. Abundancia de los yacimientos geotérmicos con base en su temperatura (Stefansson, 2005).

Los elevados precios actuales de los hidrocarburos. la declinación de

reservas del petróleo, así como la aceptación del Protocolo de Kyoto, están favoreciendo la instalación de plantas geotérmicas a nivel global, las cuales han tenido un aumento relevante en los últimos años (Tabla 2). En 2005 la generación geotermoeléctrica mundial fue de 56 798 GWh, equivalente al 0.4% de la generación mundial de energía eléctrica (que fue de 15.8 millones de GWh, EIA, 2006), pero se estima que para el año 2010 representará alrededor del 1% (Bertani, 2005).

	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Capacidad instalada (MWe)	1300	3887	4764	5832	6798	7974	8912
Generación anual de electricidad (GWh)	-	-	-	-	37 774	49 261	56 798

Tabla 2. Capacidad instalada y generación geotermoeléctrica en el mundo.

México ocupa el tercer lugar a nivel mundial en la explotación de la energía geotérmica, con una capacidad instalada de 953 MWe en cuatro campos geotérmicos de elevada entalpía, con una generación anual de 6280 GWh en 2004 (Tabla 3), lo que significa el 3.3 % de la generación eléctrica en el país (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2005).

	Cerro Prieto	Los Azufres	Los Humeros	Las Tres Vírgenes	Total
Capacidad instalada (MWe)	720	188	35	10	953
Generación anual de electricidad (GWh)	5112	852	285	33	6280

Tabla 3. Capacidad instalada y generación geotermoeléctrica en México (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2005).



El posible potencial eléctrico total de los recursos geotérmicos a nivel mundial es del orden de 1.5 Terawatts eléctricos (TWe), de acuerdo con Stefansson (2005) (Tabla 4). Para darse una idea de lo que ello significa, considérese que la capacidad eléctrica total de México es del orden de los 0.05 TWe, por lo que el potencial geotermoeléctrico mundial es treinta veces mayor. Es decir, los recursos geotérmicos del mundo podrían satisfacer la demanda de energía eléctrica de 30 países de las dimensiones de México.

	Potencial identificado	Potencial posible
Reservas útiles para generación de electricidad*	0.2 TWe	1 - 2 TWe
Reservas útiles para utilización directa	4.4 TWt	22 - 44 TWt
Potencial total*	6.0 TWt	30 - 60 TWt

* Se considera que sólo el 10% de la energía térmica se puede convertir en energía eléctrica.

Tabla 4. Potencial mundial estimado de los recursos geotérmicos (Stefansson, 2005)

Pero eso no es todo. El potencial de usos directos de la geotermia en el mundo ha sido estimado en 4.4 TWe, con un potencial posible varias veces superior (Stefansson, 2005), como se indica en la misma Tabla 4.

Por otra parte, cada vez hay más países que emplean la energía geotérmica de baja entalpía en usos directos. En 2005, 71 países del mundo utilizaban directamente la energía geotérmica en diversas aplicaciones de acuerdo con sus necesidades y nivel de desarrollo, con un consumo total de 261 Terajoules (TJ) por año (equivalente a unos 72 GWt-hora anuales) (Lund *et al.*, 2005).



Fig. 5. Usos directos de la geotermia en el mundo (cifras en MWt; datos de Lund et al., 2005)

para casas, comercios o instituciones (Lund et al., 2005).

El uso directo más extendido de la geotermia son las bombas de calor, en las que se emplea más de la mitad de los casi 28 mil megawatts térmicos de capacidad instalada que había en el mundo en esas fechas (Fig. 5). La mayoría de esas bombas de calor están operando en Estados Unidos y en Europa, habiendo aumentado el número de países que las utilizan de 26 en el año 2000 a 32 en 2005. Se estima que en este último año operaban aproximadamente 1.3 millones de bombas de calor en todo el mundo, siendo su potencia típica de 12 kWt, pero con un rango que va de los 5.5 a los 150 kWt, dependiendo el tipo de aplicación

Toma de conciencia

Estamos desintegrando el mundo a pasos agigantados. Con nuestra presencia envenenamos, aplastamos o desplazamos a los demás seres vivos para ocupar su lugar. Estamos contaminando agua, suelo y aire, y agotando nuestros recursos naturales. Nuestro planeta está reduciendo la diversidad de su vida animal, su vida vegetal y su capacidad de regeneración ambiental. De continuar esta tendencia, a mediados de siglo no alcanzará el agua ni el alimento para los humanos, y el número de especies extintas sería de más de un

millón, habiendo rebasado a las que desaparecieron en cualquiera de las grandes extinciones del pasado geológico de la Tierra.

Esas extinciones masivas fueron provocadas por fenómenos naturales. Pero las extinciones actuales, están siendo provocadas por las actividades humanas. Un gran número de especies se seguirá extinguiendo a medida que la población humana siga creciendo sin control y destruyendo los ecosistemas. Según Wilson (1992), cada hora desaparecen tres especies, y finalmente nosotros sólo somos una especie más.

La mayoría de las especies en el mundo pasa inadvertida para nosotros y viven sin que las tomemos en cuenta e incluso sin que sepamos que existen. Sin embargo, muchos de estos organismos juegan un papel fundamental en la cadena alimenticia, de tal forma que su desaparición nos afectará tarde o temprano. Su destrucción sólo presagia la de nosotros mismos. Debemos tener siempre presente que todos los seres vivos, incluidos nosotros, están relacionados a través de las interconexiones de la biosfera.

Las extinciones en masa son importantes para la evolución de la vida en general. Cuando ocurre una gran extinción, nuevas especies evolucionan y ocupan el espacio abandonado por las que desaparecieron. Durante los últimos 570 millones de años, han ocurrido cinco grandes eventos de extinción y otros menores. Todas fueron resultado de sistemas biológicos en problemas, por cambios radicales y relativamente súbitos en el medio ambiente, que impidieron que las especies se adaptaran a ellos con la rapidez suficiente.

Hoy, tan sólo en el último siglo los seres humanos hemos destruido la mitad de las selvas tropicales, hemos afectado millones de hectáreas de humedales y suelos, hemos contaminado mares con la consiguiente disminución de peces y la destrucción de arrecifes de coral que albergan una enorme variedad de organismos, hemos elevado el nivel de CO_2 atmosférico acentuando el efecto invernadero, y hemos reducido la capa de ozono que protege la vida de la radiación ultravioleta.

Hemos aceptado que los cambios atmosféricos provocados son importantes problemas internacionales (Protocolo de Kyoto), pero hemos ignorado o evitado conscientemente dar la misma importancia al cuidado de la biodiversidad. A pesar de que en la Cumbre de Río se reconoció que la biodiversidad era el más importante patrimonio de la humanidad, no se adoptaron acciones. Ni a nivel país, ni a nivel organizaciones, ni, lo que es lo peor, a nivel individual hay una toma conciencia real o compromiso, no sólo para no afectar al medio ambiente, sino para cuidar de él.

Según Orr (1994), "la crisis ecológica es sobre la esencia de lo que significa ser humano. Si la biodiversidad es la fuente de la inteligencia humana, entonces la destrucción sistemática de la naturaleza es una guerra contra la base misma de nuestra capacidad mental. Tenemos muchas razones para pensar que la mente humana no hubiese evolucionado en un paisaje lunar desecho de toda diversidad biológica".

Conclusión

Las actividades humanas han tenido una componente destructiva, sobre todo en el último siglo, y es el hombre el único responsable de la crisis que enfrenta actualmente la biodiversidad en lo particular y el medio ambiente en general en nuestro planeta. Aceptar y comprender este problema es uno de los primeros pasos que tenemos que dar para que dentro de las posibilidades de cada ser humano, de cada familia, de cada organización, surja una luz de esperanza, y la humanidad tome conciencia, actúe como un administrador responsable de los numerosos recursos que ofrece la naturaleza y cuide a los demás organismos que comparten el planeta con nosotros.

Vivimos en una época dominada por el deseo, al parecer insaciable, de los países desarrollados por seguir haciéndose más ricos, bajo el subterfugio de "mantener o mejorar la calidad de vida de sus habitantes", o de "lograr el desarrollo" de los países más pobres.

Para tener un verdadero desarrollo sustentable, debemos cambiar nuestro comportamiento que por ahora parece estar dirigido a crecer y consumir sin medida, asumiendo tácitamente que todos los sistemas productivos del planeta pueden ser incrementados al infinito para satisfacer nuestras necesidades en aumento, ignorando nuestro yo biológico, nuestro entorno y, lo que es peor, ignorando a las generaciones futuras.

Un uso más intenso y extenso de las energías nuevas y renovables, entre ellas la geotermia, puede ayudar a resolver la problemática existente y colaborar en el desarrollo sustentable, aunque bien es cierto que por ahora la geotermia sólo satisface una mínima parte del consumo energético mundial y que el conjunto de energías nuevas y renovables sólo aportan del orden del 1% (640 millones de BPE) del total de la energía producida en el mundo (72 mil millones de BPE).

Referencias

- Bertani, R. (2005). World geothermal generation 2001-2005; State of the Art. *Proc. of the World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, April 2005.
- EIA (2006). International Energy Annual 2000 Report. *Energy Information Administration*, EUA. http://www.eia.doe.gov
- FAO (2000). Agricultura mundial: Hacia el año 2010. United Nations, UE.
- FHO (2004). Future Harvest Organization Report 2004, EUA.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., y J.L. Quijano-León (2005). Update of geothermics in México. *Proc. of the World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, April 2005.
- International Food Policy Research Institute (2002). Report 2002. EUA.
- Lund, J.W., D.H. Freeston and T. Boyd (2005). World Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2005. *Proc.* of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April 2005.
- Orr, D.K. (1994). http://www.ceducapr.com/perdidabiodiversidad.htm
- PNUMA (2001). *Perspectivas del medio ambiente mundial 2000*. Reporte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Nueva York, EUA.
- Rivera, M. (1999). Pérdida de biodiversidad. Centro Eco-Educativo de Puerto Rico, EUA.
- SEMARNAT (2005). Cruzada por los Bosques y el Agua. México, D.F.
- Stefansson, V. (2005). Geothermal Assessment. Proc. of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April, 2005.

The Energy Review (2004). http://www.sourcewatch.org/index.php?title=Energy_Review_UK

UNDP (2002). Human Development Report 2002. United Nations, N.Y., USA.

UN-DESA (2001). DESA Report 2000. United Nations Department of Economic and Social Affairs, N.Y., USA.

Wilson, E.O. (1992). The Diversity of Life. W.W. Norton & Company, N.Y., USA.

WWI (2005). World Watch Institute. Report 2005. http://www.worldwatch.org

Convocatoria al Congreso Anual 2007 y a la XV Asamblea General de la Asociación Geotérmica Mexicana

La Asociación Geotérmica Mexicana (AGM) ha emitido la convocatoria para su congreso anual 2007 y su XV Asamblea General Ordinaria, con las características siguientes:



FECHA:

Viernes 21 de septiembre de 2007.

LUGAR:

Instalaciones del campo geotérmico de Los Humeros, Pue.

PROGRAMA GENERAL:

9:00 - 10:00 horas: Registro e inscripciones.

10:00 - 14:00 horas: Presentación de ponencias técnicas.

14:00 - 15:00 horas: Lunch.

15:00 - 16:00 horas: XIV Asamblea Anual.

COSTO:

Miembros de la AGM al corriente de su cuota anual: 600 pesos. No miembros: 1000 pesos. El costo incluye las memorias y un lunch en Los Humeros.

PRESENTACIÓN DE TRABAJOS TÉCNICOS:

La AGM invita a sus miembros y a la comunidad geotérmica en general a enviar trabajos técnicos relacionados con la geotermia, bajo los siguientes criterios y fechas clave:

1. Los trabajos deberán abordar temas relacionados con la geotermia.

2. Los interesados enviarán un resumen en español o inglés no mayor a una cuartilla a cualquiera de las direcciones electrónicas indicadas abajo a más tardar el viernes 13 de julio de 2007. El resumen se adjuntará como archivo en MS Word al mensaje.

3. Los autores de los trabajos seleccionados para presentación serán notificados el 27 de julio. En principio los trabajos seleccionados se presentarán oralmente disponiendo cada uno de un tiempo de 20 minutos con cinco para preguntas y respuestas, pero podrían seleccionarse algunos para presentación tipo póster. La presentación puede ser en español o inglés.

4. El trabajo en extenso deberá enviarse a las mismas direcciones a más tardar el 17 de agosto. Se enviará el texto en archivo de MS Word, sin formato especial, incluyendo tablas, y las gráficas y figuras como archivos gráficos en formato *.jpg ó *.gif. Si el texto está en español deberá incluir un resumen en inglés, y viceversa. El trabajo será sometido a arbitraje por parte de miembros distinguidos de la AGM, quienes podrán sugerir cambios y modificaciones al trabajo extenso antes de su publicación.

5. En principio se editará y distribuirá en el congreso un CD con las memorias de las presentaciones técnicas seleccionadas, pero además se publicarán algunas de ellos o todas en la revista técnica *Geotermia*. Para la preparación del trabajo en extenso se sugiere consultar las Instrucciones de Publicación en el número más reciente de esta misma revista (<u>http://www.geotermia.org.mx</u>).

6. Se otorgará constancia escrita de los trabajos presentados.

PREINSCRIPCIONES:

Se solicita atentamente a los asistentes preinscribirse al evento con anticipación. Para ello, se deberá realizar un depósito con su pago total a la siguiente cuenta de cheques de la asociación:

Banco: HSBC Sucursal: 0301 Beneficiario: Asociación Geotérmica Mexicana, AC Número de Cuenta: 4030787642 CLABE: 021470040307876425

Hecho el depósito, se agradecerá enviar un correo electrónico a cualquiera de las direcciones indicadas abajo informándolo así, y especificando el nombre (o nombres) del participante y su adscripción. Asimismo, se deberá informar si se requiere comprobante fiscal y, en caso afirmativo, el nombre, dirección y RFC al que deberá expedirse el comprobante. La fecha límite para preinscripción es el martes 18 de septiembre. También habrá inscripciones el día del evento, sujetas a la disponibilidad de lugares, pero de cualquier modo se recomienda enviar antes un correo electrónico indicando la intención de asistir.

MAYOR INFORMACIÓN:

Para mayor información, favor de dirigirse a cualquiera de las siguientes direcciones electrónicas:

José Luis Quijano León (Presidente de la AGM): <u>luis.quijano@geotermia.org.mx</u> Luis C.A. Gutiérrez Negrín (Tesorero de la AGM): <u>luis.gutierrez@geotermia.org.mx</u>

El Mundo de la Energía

(Con información recopilada por Alfredo Mañón Mercado)

Dispositivo solar para convertir CO₂ en combustible

Un equipo de químicos de la Universidad de California – San Diego (UCSD) ha desarrollado un dispositivo que permite separar las moléculas de bióxido de carbono en monóxido de carbono (CO) y oxígeno, utilizando como fuente primaria de enegía la radiación solar.

El dispostivo emplea un semiconductor y dos finas capas catalizadoras. Separa el CO_2 para extraer el CO y el O_2 mediante un proceso en tres fases. El primer paso es la captura de la energía solar de los fotones mediante el semiconductor. La segunda fase es la conversión de la energía óptica en eléctrica. El tercer y último paso es el despliegue de la energía eléctrica hacia el catalizador. El catalizador convierte el CO_2 en CO en una parte del dispositivo, y en O_2 en el otro lado.

El monóxido de carbono por sí solo no es muy útil, pero se emplean cada año grandes cantidades de este gas para manufacturar productos químicos, incluyendo detergentes y plásticos. Además, también se puede convertir en combustible líquido. La tecnología para convertir monóxido de carbono en combustible líquido existe desde hace tiempo. Se inventó en Alemania en la década de los veinte, pero se perdió interés en la técnica cuando finalizó la crisis energética de los setenta.

Elegir el semiconductor apropiado es de suma importancia para conseguir que la separación del monóxido carbono sea algo de práctico. Inicialmente se empleó un semiconductor de silicio, pero la conversión de la luz solar realizada con silicio sólo aporta la mitad de la energía necesaria para separar el bióxido de carbono, y las reacciones sólo tenían lugar si se suministraba por medios externos la otra mitad de la energía necesaria. Ahora el dispositivo emplea un semiconductor de fosfuro de galio, que absorbe una mayor cantidad de la energética luz visible. Por ello, se estima que será capaz de absorber del sol la cantidad de energía óptima para hacer funcionar al separador catalítico de bióxido de carbono.

Los investigadores de la UCSD han creado, además, una molécula de gran tamaño con tres átomos de níquel en su núcleo, que ha demostrado ser efectiva para este proceso.

Más información: http://ucsdnews.ucsd.edu



Otro proyecto para reciclar CO₂ y convertirlo en combustible

Otro estudio pionero ha descubierto una forma de transformar el bióxido de carbono (CO₂) residual en combustible útil también con la ayuda de la energía solar. Este proyecto es desarrollado conjuntamente por el Instituto Max Planck en Alemania, la Universidad Louis Pasteur en Francia y la Universidad de Patras en Grecia, coordinada por investigadores de la Universidad de Mesina en Italia. Es financiado dentro del VI Programa Marco de la Comisión Europea (VIPM).

La técnica empleada es electrocatalítica y se basa en la utilización de un catalizador de partículas de platino y paladio en el interior de nanotubos de carbono. Con ella, los investigadores han logrado romper los enlaces químicos de CO₂, que es un gas muy estable, y crear moléculas de carbono de cadena larga que pueden convertirse fácilmente en gasolina y diesel.

En una primera etapa los investigadores utilizaron luz solar con un catalizador de titanio. Así lograron dividir moléculas de agua, separando protones libres (iones de hidrógeno), electrones y oxígeno. En un segundo paso, emplearon los electrones libres para reducir el CO_2 y unir los átomos de carbono en el interior de nanotubos de carbono.

De momento, el proyecto sólo ha logrado convertir un 1% del CO_2 en combustible. El proceso se realizó a temperatura ambiente, pero es posible que con más temperatura y en un espacio más grande la eficacia de la transformación pueda ser mucho mayor. En gran parte, el resultado depende de la eficacia del sol al trabajar sobre el agua para separar el oxígeno, ya que la energía para producir el proceso se basa la energía solar.

Los investigadores consideran que dentro de diez años ya habrá reactores de energía solar potentes para convertir el CO_2 en combustible.

Más información: <u>http://cordis.europa.eu</u>

Tren propulsado por hidrógeno

El Museo de Ciencia y Tecnología de Taiwán ha desarrollado y probado con éxito el primer tren propulsado por pilas de combustible. La novedosa máquina, de un tamaño inferior a los trenes tradicionales, supone un significativo avance en el campo de esta tecnología, con la que se espera revolucionar la industria automotriz durante la próxima década.

El desarrollo del tren, primero del mundo de sus características, implicó una inversión de 400 millones de dólares. Además de no contaminar, es silencioso y no necesita recargas frecuentes. El objetivo del museo es utilizarlo con fines demostrativos y educativos.

Japón está desarrollando también un tren alimentado por hidrógeno y espera tenerlo operativo en breve plazo. La tecnología del hidrógeno también se investiga en Estados Unidos y Europa, pero aún es muy cara y no existe un método barato de fabricación y distribución de hidrógeno. No obstante, se espera que esté disponible comercialmente para la próxima década

Más información: www.nstm.gov.tw/english/index.asp

D Tren de pasajeros con biodiesel en Europa



La empresa Virgin ha puesto en funcionamiento el primer tren de pasajeros de Europa que utiliza biodiesel. Este ferrocarril cubrirá durante seis meses a prueba el trayecto entre la estación londinense de Euston y Llandudno, al norte de Gales.

El biodiesel utilizado por este tren es un B-20, es decir una mezcla de gasóleo con un 20% de biodiesel. Según la empresa, esto supone dejar de emitir 34 mil 500 toneladas de CO_2 al año, lo que equivaldría de retirar de la circulación a 23 mil automóviles.

Se espera incrementar el porcentaje de biodiesel hasta un 100% en el futuro, lo que equivaldría a retirar de la circulación 100 mil vehículos.

Más información: http://www.virgintrains.co.uk/

 Vehículos propulsados por hidrógeno en Europa Según un estudio del Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial (OPTI), de España, Europa contará con cerca de nueve millones de vehículos propulsados con hidrógeno en el año 2020, lo que representará un 5% de su parque automovilístico.

La investigación resalta que para atender a estos vehículos, la Unión Europea deberá disponer de un mínimo de 5 mil a 10 mil estaciones de servicio de hidrógeno.

El consumo de hidrógeno a gran escala dependerá de la facilidad del consumidor para acceder a él. El estudio apunta que entre 2015 y 2019 habrá un gran desarrollo de la infraestructura necesaria para el suministro de hidrógeno al por menor a usuarios finales particulares para automotores y otras aplicaciones portátiles. Entre 2020 y 2024 se construirán estaciones de servicio de hidrógeno similares a las actuales gasolineras, y el 5% de los vehículos en circulación utilizarán pilas de combustible como medio de propulsión.

El estudio del OPTI concluye que antes de 2009 empezará la utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno comprimido a altas presiones en depósitos ultraligeros, lo que facilitará enormemente su implantación en los próximos años.

Una de las soluciones pasa por la aplicación de la nanotecnología para el desarrollo de nuevos materiales que permitirán absorber el hidrógeno y disponer de un sistema de almacenamiento de alta capacidad y eficiencia energética. Otro sistema de almacenamiento estará basado en la utilización de hidruros metálicos y químicos que permitirán almacenar el hidrógeno a baja presión usarlo de manera segura.

Más información: <u>www.opti.org/index/index.asp</u>

Reducción en el costo de la energía solar fotovoltaica

La industria solar fotovoltaica ha entrado ya en una curva que conducirá a una rápida reducción de los costos instalados, "que la convertirá en una opción energética corriente en los próximos años", según una evaluación del sector realizada por el *Worldwatch Institute* y el *Prometheus Institute* de Cambridge, Massachussets. El informe prevé que la reducción será de un 40% para el año 2010.



"La producción de celdas fotovoltaicas se ha multiplicado por seis desde 2000 y creció en un 41% sólo en 2006", señala Worldwatch. "Aunque la energía solar vertida a la

red aún representa menos de un 1% de la canasta energética mundial, se incrementó en un 50% en 2006 hasta llegar a los 5 mil MW, impulsada por los mercados alemán y japonés".

A pesar de las fuertes limitaciones impuestas por la escasez de silicio de grado solar, el informe indica que en los próximos dos años entrarán nuevas unidades de producción de silicio en más de una docena de empresas en Europa, China, Japón y Estados Unidos. En 2006, y por primera vez, más de la mitad del polisilicio se destinó a la producción de celdas fotovoltaicas. "Junto con los avances tecnológicos, el incremento de la oferta de polisilicio reducirá los costos de manera rápida, previsiblemente en más de un 40% en los próximos tres años", según *Prometheus*.

Worldwatch agrega que otro factor importante es la presencia emergente de China como productor de equipos de bajo costo. En 2006 China rebasó a Estados Unidos y se convirtió en el tercer productor mundial de células, sólo detrás de Alemania y Japón. Finalmente, la producción de celdas de película fina –que emplean cantidades minúsculas de silicio– está en auge. Y la ampliación de la capacidad de producción de película fina está atrayendo grandes inversiones de capital de riesgo hacia las empresas.

Más información: http://www.worldwatch.org.

Opera en España la mayor central fotovoltaica del mundo

En marzo de 2007 se inauguró en la población de Milagro, provincia de Navarra, España, la central solar Monte Alto que es la instalación fotovoltaica de mayor producción del mundo, ya que tiene una capacidad instalada de 9.55 MW, con los que se espera generar 14 GWh anuales.



Monte Alto ocupa una superficie de 51 hectáreas en un paraje rústico próximo al casco urbano de Milagro. Cuenta con 889 estructuras solares, de las que 864 están dotadas de seguimiento solar automatizado y el resto son estructuras fijas, adaptadas a la topografía del terreno. Las primeras están montadas sobre seguidores Buskil. desarrollados por la compañía Acciona Solar, y de ellas 308 corresponden al modelo K-12, de 11 kW de potencia nominal unitaria y 100 m^2 de superficie de captación, y los 556 restantes al modelo K-6, de 5 kW y 50 m². Las estructuras sustentan un total de 52 mil 706 módulos fotovoltaicos.

La generación anual estimada equivale al consumo eléctrico de unos 5 mil hogares. Si esta generación fuera producida por una carboeléctrica se emitirían a la atmósfera 13 mil 454 toneladas de CO_2 al año. La central solar tendrá un efecto depurativo para la atmósfera similar al de 673 mil árboles en el proceso de fotosíntesis.

La planta de Monte Alto es también la mayor en el llamado régimen de propiedad coparticipada, ya que cuenta con 753 propietarios, que realizaron una inversión total de 65 millones de euros. El concepto, patentado por Acciona, permite la agrupación en un mismo recinto de pequeñas instalaciones fotovoltaicas de propiedad individual, que comparten infraestructuras y servicios con objeto de optimizar su gestión y rendimiento energético.

Más información: www.acciona-energia.com

□ La mayor central eólica marina se proyecta en Inglaterra

El promotor británico Farm Energy2 ha dado a conocer un proyecto para desarrollar en el Reino Unido el mayor parque eólico marino del mundo. Se trata de un complejo de 1,5 GW de potencia que utilizará 350 aerogeneradores con una potencia unitaria de más de 4 MW.

El proyecto, llamado Atlantic Array, se ubica en aguas atlánticas fuera del Canal de Bristol en la costa del condado de Devon al suroeste de Inglaterra. La inversión estimada asciende a unos 4 mil 300 millones de euros. La energía producida será el equivalente al consumo de un millón de hogares, representando aproximadamente el 53% de la demanda del suroeste de Inglaterra, según cálculos de Farm Energy2.

Las aguas de esta parte de la costa son más profundas que las de los emplazamientos marinos ya explotados en el Reino Unido, con la excepción del proyecto de demostración de Beatrice, de 5 MW, en Escocia, instalado en aguas de 45 m de profundidad.

Más información: www.regensw.co.uk

Geothermal History

Geothermal History, es una nueva 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: <u>cosmos@dcn.org</u>

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 Iuis.guijano@cfe.gob.mx, Iuis.gutierrez03@cfe.gob.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: <u>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, <u>Referencias</u>, *Apéndices*.</u>

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.guijano@cfe.gob.mx, luis.gutierrez03@cfe.gob.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. *Geotermia* 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: <u>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, <u>Conclusions</u>, Verification, Acknowledgement, <u>References</u>, Appendix.</u>
- 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. *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. You may ask for a copy of the review of any paper published in *Geotermia* 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.