

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: hector.perez01@cfe.gob.mx

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.

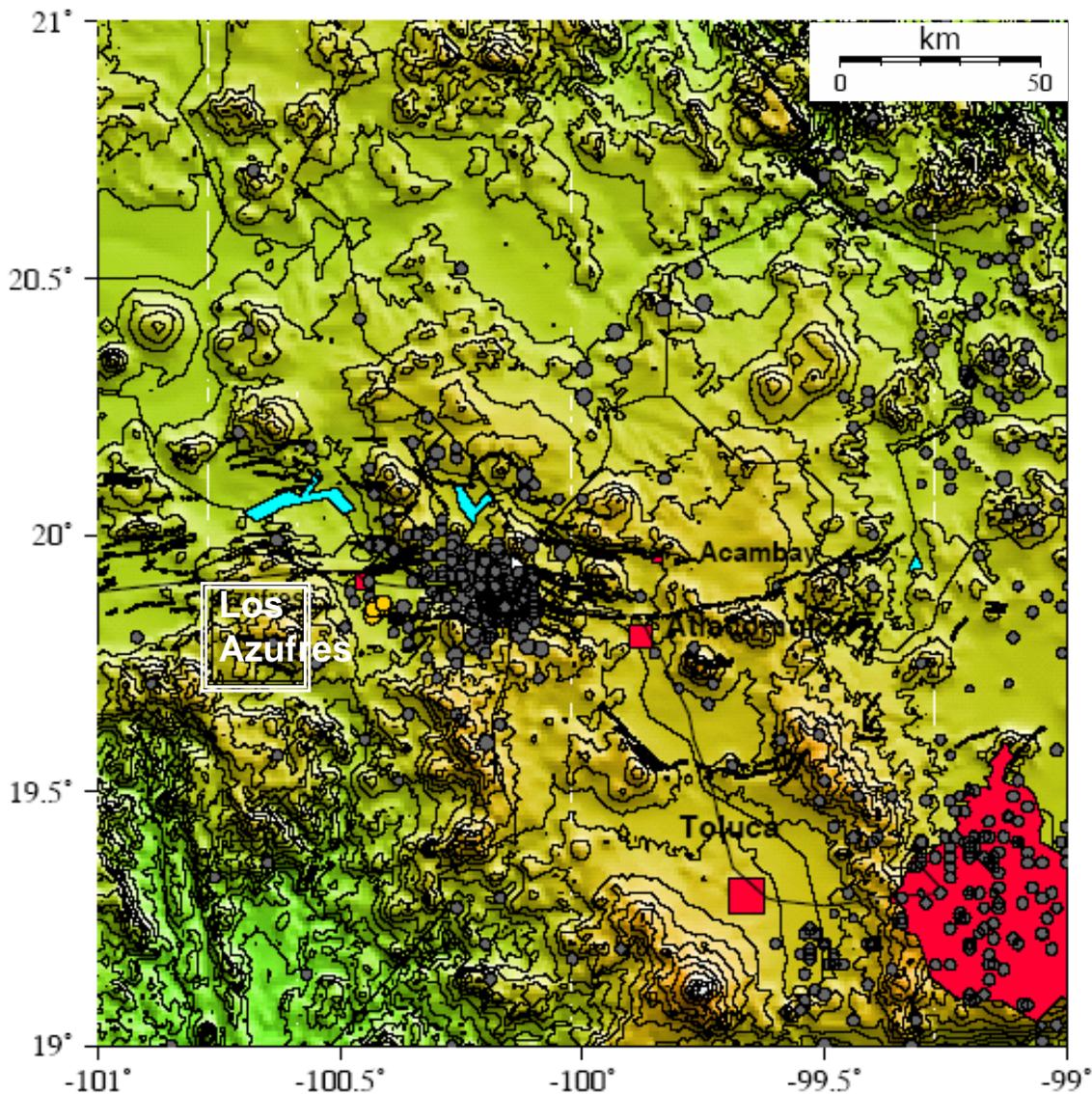
Keywords: Los Azufres, seismology, tectonics, geothermal fluid movement.

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 Sprengnether 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.

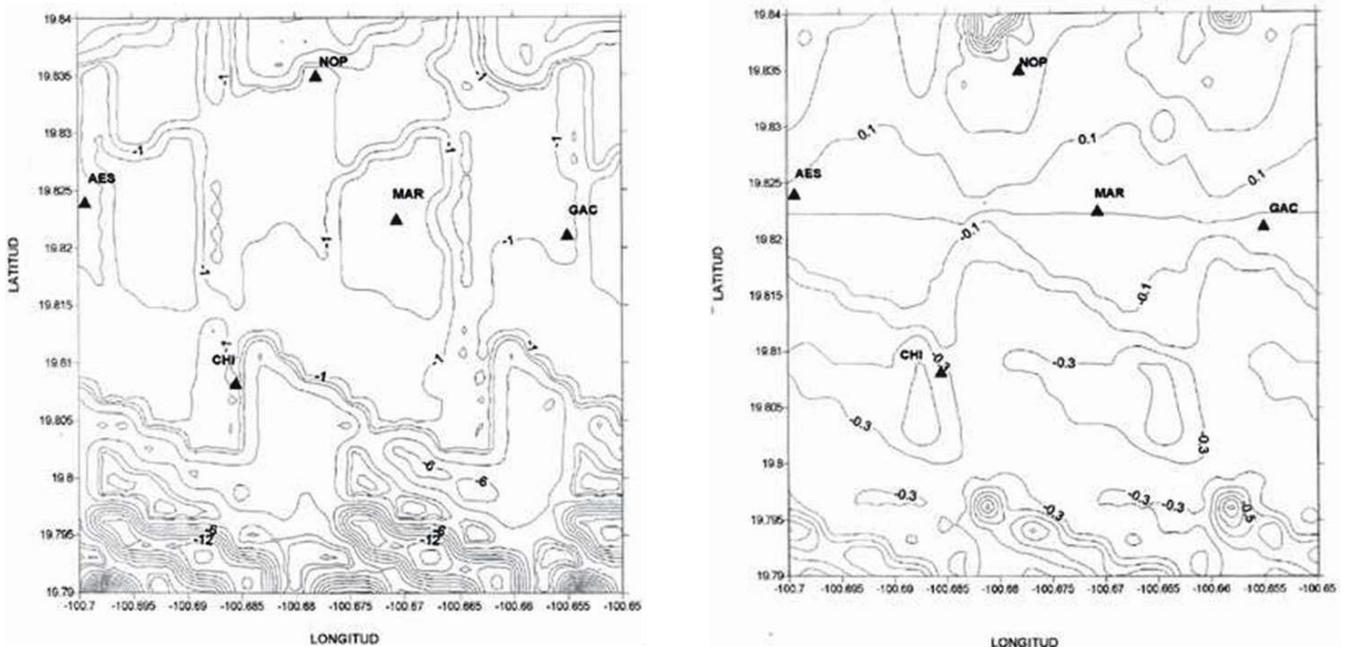


Fig. 2 (Izquierda). Incertidumbre para la profundidad $Z = 4$ km. Fig. 3 (derecha). Incertidumbre del plano horizontal XY para la profundidad $Z = 4$ km.

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 arribos de las ondas P y S, y cuya coda decae en forma exponencial. Estos sismos están asociados a 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.

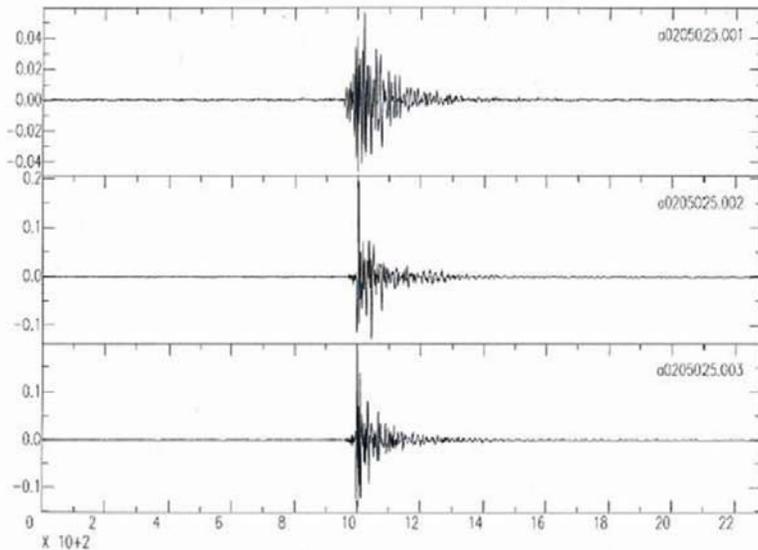


Fig. 4. Sismo local con $S-P=0.3$ s con una distancia a la estación de 1.2 a 1.5 km.

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.

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:

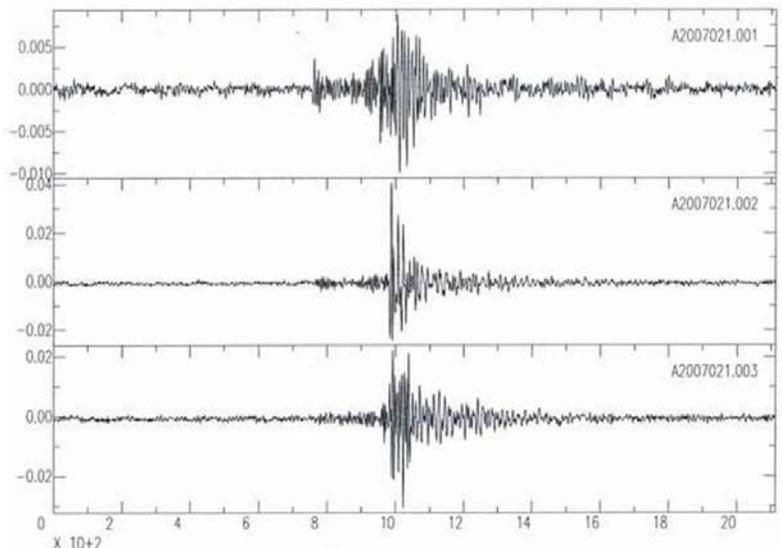


Fig. 5. Sismo local pero fuera del campo con $S-P$ mayor que VT

Velocidad de la Onda P (km/s)	Profundidad a la parte superior 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 yacimiento de Los Azufres propuesto por Birckle *et al.* (2000), pudiendo observarse que a 3 km de profundidad su modelo no requiere de un medio tan fracturado como a profundidades menores, donde ocurre la separación de las fases líquida y gaseosa. 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 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

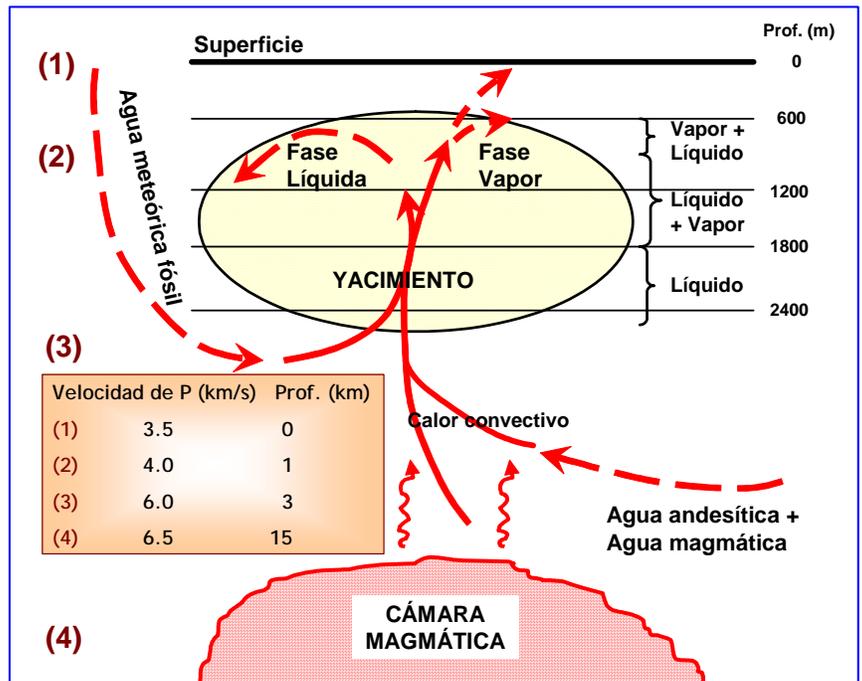


Fig. 6. Modelo de velocidades. (El modelo de circulación de fluidos fue tomado de Birckle et al., 2000.)

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.

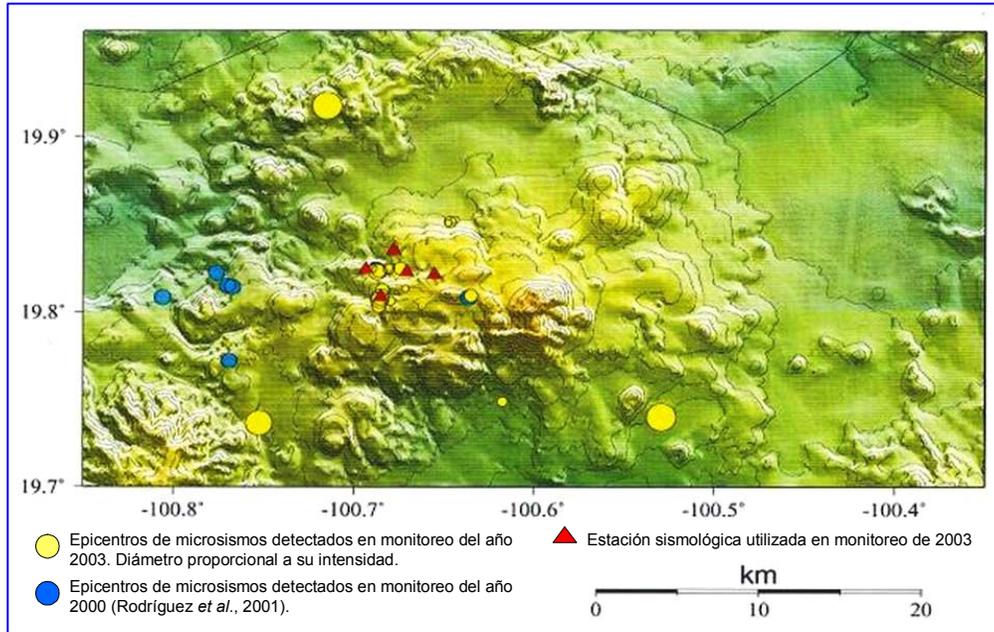


Fig. 7. Epicentros de microsismos monitoreados en 2001 y 2003.

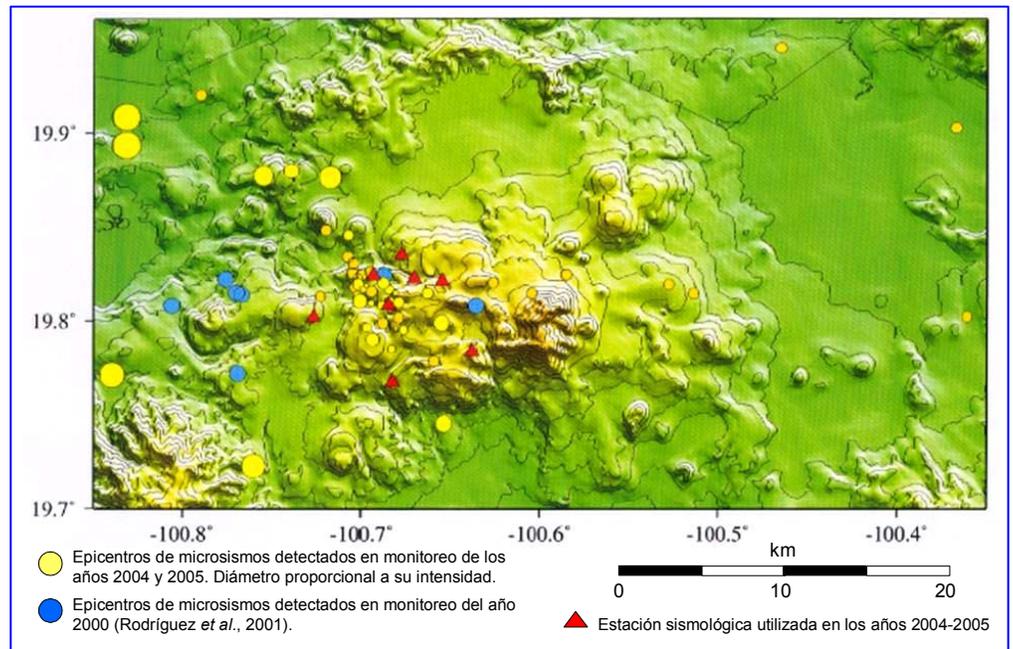


Fig. 8. Epicentros de microsismos monitoreados en 2001, 2004 y 2005.

Algunos de los sismos de mayor magnitud ($M \sim 1.5-1.7$) 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

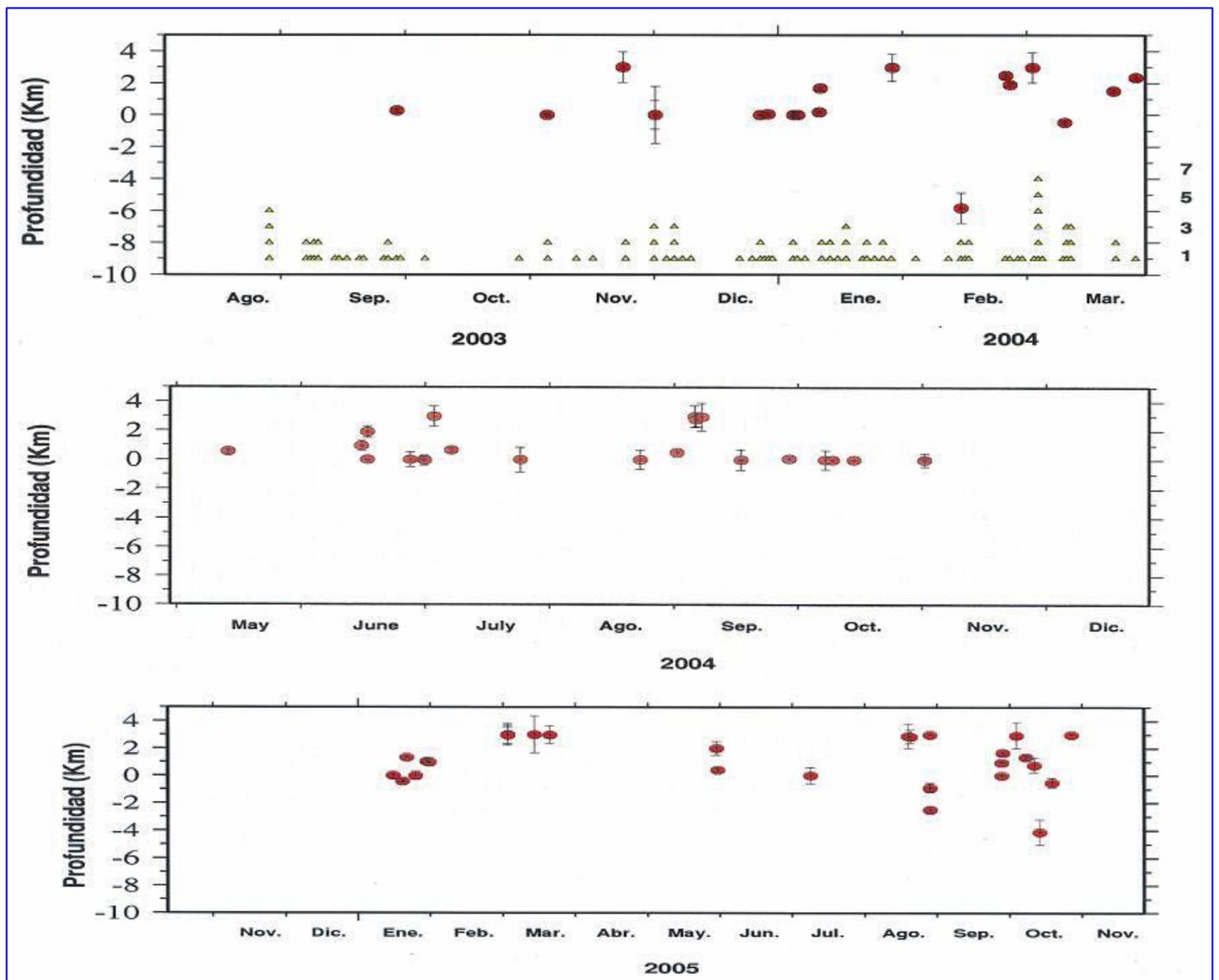


Fig. 9. Profundidad de los sismos localizados por tres o más estaciones en los tres años de monitoreo.

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.

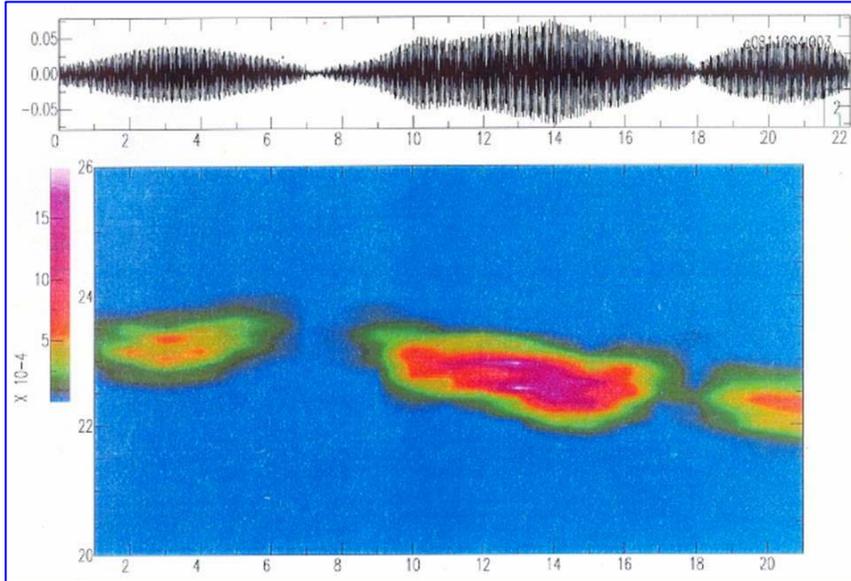


Fig. 10. Sismo de tipo armónico en Agua Escondida (23 Hz).

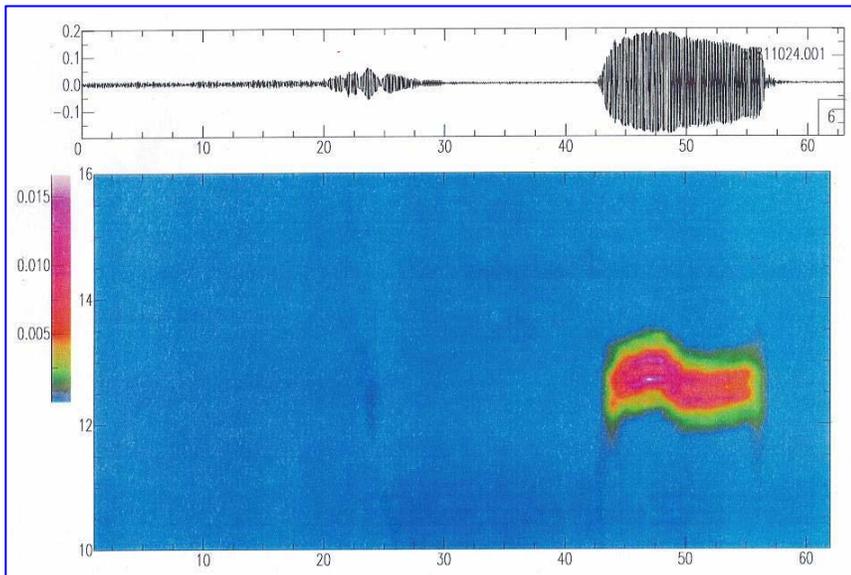


Fig. 11. Sismo armónico localizado a 200 m de distancia horizontal y 428 m bajo la superficie.

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 profundidades observadas, las magnitudes de los eventos estudiados y la distribución temporal de eventos tectónicos son similares a lo largo del periodo de observación, lo que sugiere que no hay cambios importantes en el estado de esfuerzos del campo geotérmico de Los Azufres.
- 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 teleméricamente 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. Jour.*, 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 microearthquake 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.