

Una herramienta poderosa

El uso de la tomografía microsísmica dependiente del tiempo para el monitoreo de los reservorios geotérmicos

G.R. Foulger¹ y B.R. Julian²

¹Universidad de Durham, Reino Unido

²U.S. Geological Survey, Menlo Park, California, EUA.

Resumen extenso del artículo original, publicado en el *Bulletin del Geothermal Resources Council (GRC)* Volumen 33, No. 3, Mayo-Junio de 2004, reproducido con permiso del editor. Traducción y resumen de José Luis Quijano León.

La producción de energía en las zonas geotérmicas tiene como consecuencia cambios físicos en los reservorios, debido a cambios de temperatura, presión, de fase del agua de poro y extracción progresiva de masa. Todo esto afecta la velocidad de las ondas sísmicas, que puede ser detectada mediante tomografía microsísmica dependiente del tiempo (TMS). El método se ha utilizado en Los Geysers, en la Montaña Mammoth y en Coso. El estudio de Los Geysers es el más ambicioso. Ahí se llevaron a cabo campañas de medición en 1991, 1993, 1994, 1996 y 1998. Se detectó una anomalía intensa de la razón V_p/V_s , que delinea el volumen donde la presión disminuyó, el agua de poro se reemplazó con vapor y los minerales arcillosos se deshidrataron. En la Montaña Mammoth se realizaron campañas en 1989 y 1997, que revelaron un incremento de la razón V_p/V_s en una región que rodea al volcán. Este incremento puede relacionarse con la migración de CO_2 hacia la cumbre de la montaña, acompañada de una disminución en los volúmenes periféricos, localizados por debajo de las zonas de venteo superficial. Los resultados preliminares del estudio de Coso sugieren una disminución en la razón V_p/V_s en una área de la porción más productiva del reservorio. Es deseable que se lleven a cabo varios avances para optimizar el método TMS. No obstante, el método promete ser una herramienta importante en el monitoreo de reservorios en los campos geotérmicos productivos.

Introducción

Los cambios físicos de los reservorios bajo explotación pueden ser detectados en un lapso de uno a dos años. La medición de estos cambios puede ser una forma efectiva de monitorear las condiciones de reservorio.

Los procesos de reemplazo del agua de poro por vapor, la disminución de presión y la deshidratación de arcillas afectan de manera diferente la velocidad de las ondas compresionales (V_p) y la de las ondas transversales (V_s). Si se monitorean ambas velocidades es posible separar los diferentes efectos. El uso de explosiones para generar ondas sísmicas, por lo general, no es práctico en campos geotérmicos. Además estas explosiones no generan ondas transversales intensas. Sin embargo, la producción e inyección con frecuencia dan origen a microsismos, que se originan en las partes profundas de reservorio y generan ondas compresionales y transversales con amplitudes útiles.

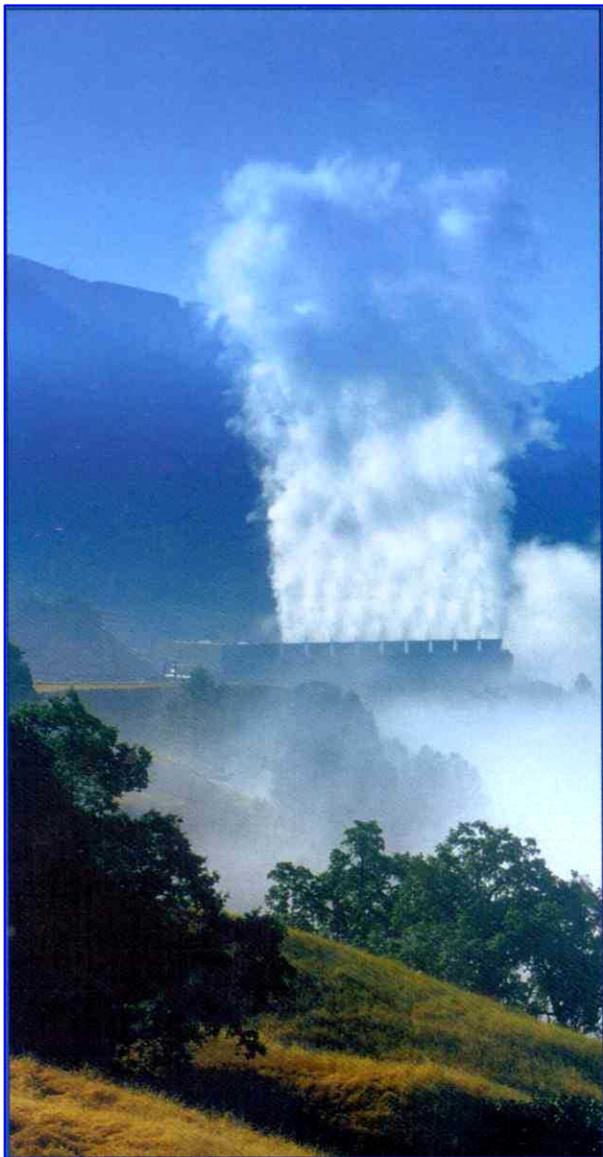
La tomografía tridimensional dependiente de tiempo de las velocidades V_p y V_s es la técnica más poderosa para observar los cambios en los reservorios debidos a la extracción. Como regla general, se recomienda una campaña de medición cada dos años. La técnica TMS involucra el cálculo iterativo de la localización de los microsismos y de la estructura tridimensional de las velocidades de onda, a partir de los tiempos de llegada de las ondas a la red de sismógrafos instalados en el área de estudio. Estos estudios requieren idealmente de los siguientes elementos:

- Varios cientos de microsismos registrados por año y ampliamente distribuidos en la zona de estudio.
- Una buena red de sismógrafos, de preferencia digitales. Diez estaciones de tres componentes son un número conveniente.

Los cambios en los datos obtenidos año con año son sutiles. Por ello, es importante eliminar los sesgos sistemáticos que pudieran ocultar los efectos sujetos a investigación. Se debe usar, en todas las campañas, el mismo modelo inicial de la corteza, la misma parametrización estructural y el mismo arreglo de estaciones. Las estrategias de procesado de datos deben ser desarrolladas para cada campo en particular, mediante ensayo y error.

En los estudios de campos hemos utilizado el programa de cómputo SIMULPS 12 (Evans y otros, 1994) y el procedimiento de análisis descrito por Foulger y otros (1995) y Gunasekara y otros (2003).

Los Geysers, California



El campo de Los Geysers tiene una superficie de 72 km² y un espesor del orden de 4 km. Los pozos producen vapor seco. En 1968 la presión media del reservorio era de 3.5 Mpa, actualmente es de 2 Mpa. La temperatura ha permanecido constante, alrededor de 240° C, en el reservorio principal.

La extracción de vapor y la inyección de líquido inducen una actividad microsísmica continua, a una tasa de varias decenas de eventos al día. Se distribuyen en todo el espesor del reservorio, desde la superficie hasta 4 km de profundidad. Existe una red permanente de 20 sismógrafos, 8 de los cuales son de tres componentes.

Se estudió un volumen de 20 x 20 x 4 km y se invirtieron de 150 a 300 microsismos de cada año, para obtener los valores de V_p y V_s . La anisotropía se trató con las mediciones de la llegada de la onda de cizalla, rotando numéricamente la componente horizontal de los sismogramas.

La distribución espacial de la razón V_p/V_s indica valores más bajos en la zona más explotada del reservorio. Además esta razón decrece con el tiempo. Este decremento puede deberse a uno de los siguientes tres mecanismos, o a una combinación de ellos:

- 1) Invasión de los poros y fracturas de la roca por vapor o CO₂.
- 2) Decremento en la presión del reservorio.
- 3) Desecación de los minerales arcillosos de la roca.

Estos tres procesos tienen lugar en el reservorio de Los Geysers. El tratamiento separado de V_p y V_s indica que el proceso dominante en el centro del reservorio es la disminución del agua y de la presión, mientras que en las regiones NW y SE es la deshidratación de los minerales.

La montaña Mammoth en la Caldera de Long Valley, California

La Caldera de Long Valley es un volcán silícico que ha manifestado actividad volcánica y sísmica desde 1978. La montaña Mammoth es un volcán dacítico de 3380 m, localizada en el borde SE de la caldera. En 1989 hubo una inyección de un dique delgado en el edificio, acompañado de un enjambre de sismos. Desde entonces la montaña ha estado activa. La actividad se ha visto acompañada de un incremento en el flujo de calor, del venteo de CO₂ y de cambios en la razón He₃/He₄ en una fumarola de vapor. También ha habido un venteo diseminado y difuso de CO₂, a través del suelo, que ha matado grandes áreas de árboles.

Sorey y otros propusieron que los 2 km superiores del edificio del volcán están relativamente fríos y secos. Por debajo existe una bolsa de CO₂ a gran presión, que pudiera ocupar varias decenas de kilómetros cúbicos. La bolsa está sellada por una roca impermeable en la parte superior y probablemente le subyace un reservorio líquido saturado de CO₂.

Durante la crisis de 1989 y en 1997 se operó una red densa de sismómetros. El número de sismos registrados fue suficiente para poder realizar la inversión tomográfica y obtener los valores de V_p y V_p/V_s a través de los 5 km superiores de la corteza.

La inversión de los datos de 1989 revela una anomalía negativa coherente de la razón V_p/V_s en los 2-3 km superiores de la montaña. El borde de la anomalía se correlaciona con las áreas de venteo superficial de CO₂. La comparación de los datos de 1997 y 1989 muestra un incremento coherente de la razón V_p/V_s en la mitad sur de la montaña, que coincide con la zona que ha experimentado una degasificación de CO₂ significativa.

Consideraciones teóricas y experimentos de laboratorio indican que la razón V_p/V_s en areniscas saturadas de hidrocarburos disminuye de manera significativa cuando éstas son invadidas por CO₂, debido a un incremento en la compresibilidad del conjunto roca-fluido. Sin embargo, un estudio en Texas reveló que la inundación *in situ* de un reservorio de petróleo con CO₂ produjo un incremento de la presión de poro que anuló el incremento en la compresibilidad del conjunto roca-fluido. Por ende, la razón V_p/V_s pudo haber permanecido sin cambio. El examen por separado de los cambios en V_p y V_s sugiere que, entre 1990 y 1997, el gas emigró hacia un volumen de roca en los 2 km superiores de la montaña, donde se emplazó el dique, y que hubo una disminución de gas en los volúmenes periféricos, donde tiene lugar el venteo superficial.

La red sísmica desplegada en 1997 incluyó la zona geotérmica del manantial termal de Casa Diablo. Se identificó una pequeña anomalía negativa de la razón V_p/V_s , en los 2 km superiores de la zona. Esta observación se puede explicar fácilmente con un incremento del contenido de vapor en un volumen de unos 8 km³. Los resultados de la tomografía no proveen evidencia de altas temperaturas por debajo de Casa Diablo, en concordancia con lo encontrado con perforaciones y prospecciones realizadas en la zona, lo que sugiere que no es un área de ascenso primario de fluidos geotérmicos.

La zona geotérmica de Coso, California

Actualmente (2004) se lleva a cabo un estudio de tomografía dependiente del tiempo. Los objetivos son monitorear a largo plazo la evolución del reservorio y probar la habilidad del método para observar los experimentos de estimulación del reservorio mediante inyección de fluidos.

Desde el inicio de los años 90 opera una red de 18 sismómetros digitales de tres componentes, instalados en pozos. La zona es muy activa; normalmente se registran de 10 a 15 microsismos por día.

Los resultados preliminares muestran cambios detectables en las velocidades de onda, entre los años 1996 y 2002. La inversión de los datos de 1996 revela una anomalía negativa de la razón V_p/V_s en los 2 km superiores, en la parte centro-norte, que es la más productiva del campo. Las anomalías negativas de los parámetros V_p y V_s en el NW y NE coinciden aproximadamente con valores altos de la razón V_p/V_s , a profundidades de 1 a 2 km. Esta correlación es inusual y no se observó en Los Geysers o en la Montaña Mammoth.

Comparando las estructuras de 1996 y 2002, se observa que ambos parámetros V_p y V_s se incrementaron, pero el incremento en V_s fue dominante, de tal forma que la anomalía negativa de la razón V_p/V_s se volvió más pronunciada. Los cambios observados son consistentes con el reemplazo de agua de poro por vapor a profundidades someras, decremento de presión o deshidratación de algunos minerales.

Retos futuros

Para incrementar la utilidad de esta metodología promisoriosa, es necesario avanzar en tres aspectos. En primer lugar se requiere contar con más casos históricos.

En segundo término, es necesario desarrollar paquetes de cómputo a la medida del usuario, para aplicarse a objetivos geotérmicos. Los programas actuales son para aplicaciones tectónicas generales. Sería conveniente contar con programas optimizados para dimensiones espaciales de pocos kilómetros y que pudiesen invertir conjuntos de datos de épocas diferentes de manera simultánea. Las señales sutiles que se desea registrar requieren de los mejores métodos numéricos posibles.

Por último, los resultados de la tomografía se deben comparar con datos de producción y con más información sobre la evolución física del reservorio, de tal manera que los cambios en los parámetros V_p , V_s y V_p/V_s puedan ser interpretados cuantitativamente. Cuando esto se logre, la tomografía microsísmica dependiente del tiempo probará ser una herramienta poderosa para cuantificar el agotamiento de los reservorios geotérmicos y una guía para las estrategias de reinyección, con lo cual podrá prolongarse al máximo la vida productiva de los mismos.

Referencias mencionadas

- Evans, J.R., D. Eberhart-Phillips, and C.H. Thurber (1994). *User's manual for SUMLPS12 for imaging VP and VP/VS, a derivative of the Thurber tomographic inversion SIMUL3 for local earthquakes and explosions*. US Geological Survey Open File Report, 142 p.
- Foulger, G.R., A.M. Pitt, B.R. Julian, and D.P. Hill (1995). Three dimensional structure of Mammoth Mountain, Long Valley Caldera, from seismic tomography. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, vol. 76 (Fall Meeting Supplement).
- Gunasekera, R.C., G.R. Foulger, and B.R. Julian (2003). Four dimensional tomography shows progressive pore-fluid depletion at the Geysers geothermal area, California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108.
- Sorey, M.L., W.C. Evans, B.M. Kennedy, C.D. Farrar, L.J. Hainsworth, and B. Hausback (1998). Carbon dioxide and helium emissions from a reservoir of magmatic gas beneath Mammoth Mountain, California. *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, pp. 15303-15323.