Proceedings of the
Latin-American Geothermal Congress 2025
LGC 2025
San Salvador, El Salvador
22–26 Sept. 2025

Análisis del comportamiento de la porosidad en el acuífero profundo del yacimiento geotérmico las Tres Vírgenes y su implicación en la variabilidad del comportamiento sísmico

Martín Carlos Vidal García[a], José Antonio Martínez González[b], Fernando J. Guerrero[c], Eduardo Alfredo García Zamorano[d]

[a] Departamento de Geología de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México C.P. 04510, correo electrónico: mvidal@unam.mx.

[b] Departamento de Geofísica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México C.P. 04510.

[c] Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 62580 Temixco, Morelos, México.

[d] LabGeo Departamento de estudios de Geología, Santa Tecla, La Libertad en El Salvador.

Resumen

El modelo hidrogeológico del yacimiento geotérmico las Tres Vírgenes fue realizado con aportaciones de geología, geofísica e hidrogeología, existen dos acuíferos no conectados, un acuífero somero con 100 metros de profundidad siguiendo un comportamiento de flujo local. El acuífero profundo se localiza en la formación Pre-Comondú, en una secuencia de andesitas con intercalación de areniscas de 100 a 252 m de espesor y una porosidad del 19% de acuerdo a los resultados de los pozos exploratorios LV2, LV7 y LV11 de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la porosidad primaria se presenta en las areniscas de origen marino que contiene el agua fósil del yacimiento, el sistema acuífero evidencia un alto fracturamiento en su base reportando una micro brecha producto de los esfuerzos estructurales de la región, en el contacto con el basamento constituido por granodiorita se ha identificado la presencia de fallas e intenso fracturamiento permitiendo las condiciones de la interacción del agua subterránea y el fluido termal ascendente a una profundidad de 1920 hasta los 2420 m con temperaturas del orden de 50°C a 150°C, comportándose como un medio de doble porosidad con permeabilidad alta.

El yacimiento geotérmico en el periodo de 1992 a 2017 fue monitoreado con sensores sísmicos, lo que permitió la caracterización de las fallas y la sismicidad local, posteriormente entre 2010 a 2017 se analizaron ocho sitios mediante relaciones espectrales, identificándose una frecuencia dominante de 0.5 Hz asociada a los depósitos vulcano-sedimentarios. Se observó una disminución en la amplitud de esta frecuencia tras sismos locales y la estimulación de los pozos de inyección. Estos cambios reflejan las variaciones de tensión que afectan la velocidad sísmica de las areniscas del acuífero profundo, observando que existen dos direcciones preferenciales en el cambio de las propiedades dinámicas con una dirección preferencial N-S y SE-NO respectivamente.

Palabras clave: acuífero profundo, porosidad, variabilidad sísmica, ruido sísmico.

Introducción y Metodología

La investigación realizada tiene como objetivo conocer el comportamiento de la porosidad en el acuífero profundo, considerando los procesos del agua subterránea en el yacimiento geotérmico de las Tres Vírgenes, la zona en estudio ha sido instrumentada con sensores sísmicos desde 1992 al 2017, para obtener la caracterización de los sistemas de fallas y la sismicidad asociada. La metodología empleada fue la investigación bibliográfica y documental para realizar el análisis de la información litológica, registros geofísicos, resultados de los pozos profundos, el análisis de la sismicidad y el modelo del cociente espectral.

Localización

El yacimiento geotérmico Las Tres Vírgenes se localiza en el estado de Baja California Sur en México, cuenta con 11 pozos perforados; siendo 4 pozos productores, 3 pozos de inyección y 4 pozos exploratorios, con una generación de capacidad eléctrica instalada de 10 MW. Los pozos fueron perforados en el complejo volcánico formado por los volcanes la Virgen, el Viejo y el Azufre.

Resultados

A partir de un modelo hidrogeológico y numérico del yacimiento geotérmico Las Tres Vírgenes realizado en TOUGH2, se describen los resultados: 1) En el acuífero somero se realizó un balance de aguas subterráneas, la recarga es de 5.7 millones de m^3 en el valle que rodea al complejo volcánico de Las Tres Vírgenes, para incorporarse al acuífero hasta una profundidad de 100 m. 2) Posteriormente el agua subterránea continúa con un movimiento descendente por medio de las fallas y fracturas; ya que las rocas son impermeables correspondiente al Mioceno y Plioceno; el agua subterránea se infiltra lentamente por las fallas en una escala de tiempo de miles de años. 3) El acuífero profundo se localiza en la formación Pre-Comondú correspondiente al Oligoceno (Vidal M. et al, 2024), en una secuencia de andesitas con intercalación de areniscas de 100 a 252 m de espesor con una porosidad del 19% considerando los resultados de los pozos exploratorios LV2, LV7 y LV11 de la CFE, la porosidad primaria se presenta en las areniscas de origen marino que contiene el agua fósil del yacimiento, el acuífero profundo evidencia un alto fracturamiento en su base reportando una micro brecha producto de los esfuerzos estructurales de la región, en el contacto con el basamento constituido por granodiorita se ha identificado la presencia de fallas e intenso fracturamiento permitiendo las condiciones de la interacción del agua subterránea y el fluido termal ascendente a una profundidad de 1920 hasta los 2420 m con temperaturas del orden de 150°C a 274°C, comportándose como un medio de doble porosidad con permeabilidad alta como se muestra en la figura 1.

El yacimiento geotérmico ha sido objeto de un seguimiento sísmico detallado a través del análisis de ruido sísmico ambiental, el enfoque, no invasivo y de bajo costo, permite estudiar los cambios dinámicos del subsuelo en contextos donde intervienen factores naturales y antropogénicos como la inyección de fluidos geotérmicos. En particular, se aplicó el cociente espectral horizontal/vertical (H/V),

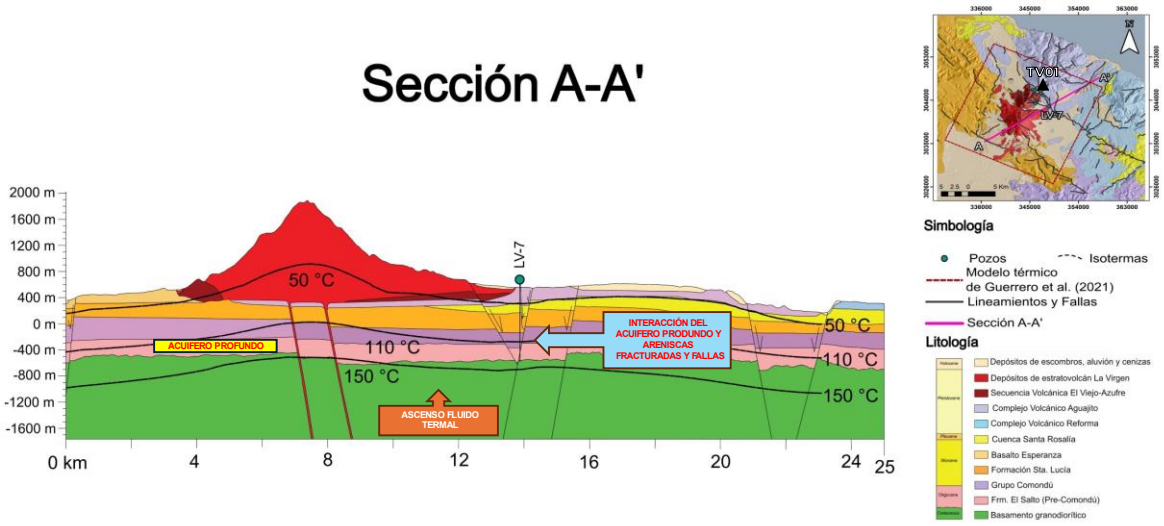


Figura 1. Sección hidrogeológica del Pozo LV7 tomada y modificada de Guerreo et al., 2021.

(Nakamura, 1989), para detectar variaciones temporales en la respuesta sísmica del terreno, asociadas a la evolución del campo de esfuerzos en profundidad. Se utilizaron datos continuos del periodo de 2010 al 2017, registrados para la estación sísmica TV01, instalada por la CFE (figura 2). El procesamiento de los registros se realizó empleando ventanas de tiempo de 81.92 segundos, con filtros adecuados y normalización energética, de acuerdo con los principios de campo difuso. El cociente H/V se calculó de forma diaria, obteniéndose espectros de densidad que revelan la evolución temporal de las frecuencias de resonancia del terreno. La frecuencia de interés se centró en 0.5 Hz, la cual corresponde a los estratos del acuífero profundo compuesto por depósitos vulcano-sedimentarios y el basamento de granodiorita.

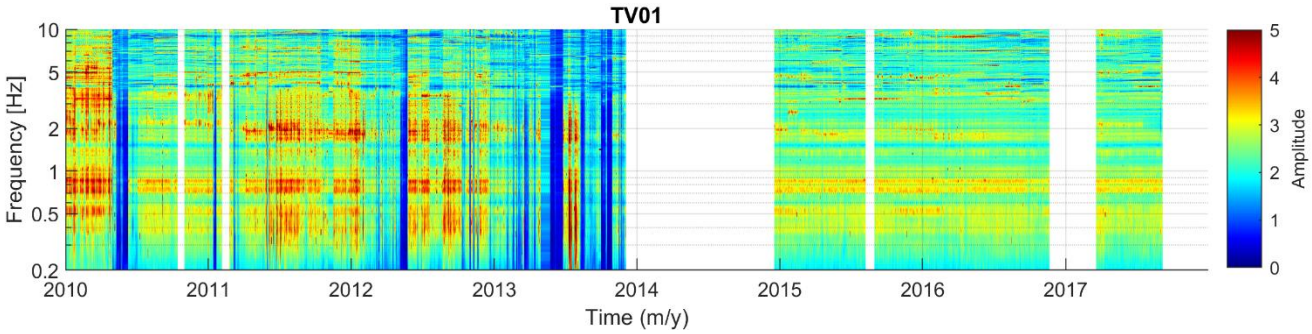


Figura 2. Comportamiento del terreno expresado en términos de cocientes espectrales para los años de análisis 2010 a 2017, para la estación TV01 por presentar mayor cantidad de información.

Discusión

Se confirmó que la frecuencia de 0.5 Hz funciona como un trazador confiable del estado de esfuerzos en el subsuelo. Se observaron descensos consistentes de amplitud tras eventos sísmicos de magnitud mayor a 2.0, y posteriormente una estabilización hacia finales del año. El tiempo de recuperación del estado de

esfuerzos llega a durar de seis meses hasta un año en algunos casos. El análisis también permitió diferenciar entre zonas más activas de inyección y regiones más estables, destacando la utilidad del método H/V para evaluar espacialmente la respuesta del terreno.

Conclusiones

El acuífero profundo, ubicado en las areniscas marinas con presencia de fallas y fracturamiento, genera una condición de doble porosidad en la formación Pre-Comondú. Esta configuración permite la interacción del agua subterránea con el medio geológico, facilitando su movimiento a temperaturas del orden de 110 °C. Los resultados indican que, en la parte profunda de los pozos LV2 y LV11, existe un intervalo de fallas y fracturas dentro del basamento de granodiorita, a través del cual asciende el fluido termal con temperaturas superiores a 150 °C y con alta permeabilidad. Por otra parte, el estudio demuestra que el análisis espectral H/V es sensible a los cambios en el estado de esfuerzos provocados por la actividad de producción del campo geotérmico. Esto se refleja en modificaciones de la permeabilidad, apertura de fallas, contenido de agua y condiciones termodinámicas, factores que afectan directamente las velocidades sísmicas de las areniscas y la granodiorita. Este análisis, complementado con el modelado teórico de amplitudes y frecuencias, constituye una herramienta poderosa para el monitoreo continuo y el entendimiento de las condiciones dinámicas del subsuelo. Su sensibilidad a variaciones inducidas tanto por actividad sísmica como por operaciones geotérmicas lo posiciona como un método eficiente para la gestión del riesgo, la planificación de estrategias de explotación sustentable y la comprensión profunda de la interacción entre la tectónica y la ingeniería en campos geotérmicos activos.

Agradecimientos: Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Proyecto PAPIIT No. IA 104424 Convocatoria 2024. Modelado computacional de yacimientos geotérmicos de alta entalpía.

Referencias:

[1] Comisión Federal de Electricidad, 1993. Informe final del sistema hidrogeológico regional de la Zona geotérmica de las Tres Vírgenes, Baja California Sur. Gerencia de proyectos geotermoeléctricos, Morelia. Reporte interno pp.82.
[2] Guerrero J. Fernando, Prol L. Rosa María, Vidal G. Martín C., García Z. Eduardo, Hernández H. Mario, Pérez Z. Daniel, Rodríguez D. Augusto, Membrillo A. Alejandra. (2023). A natural state model in TOUGH2 for the Las Tres Vírgenes geothermal field, Baja California Sur, México. Geothermics 113 (2023) 102750, Edit. Elsevier.
[3] Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of surface layers using microtemor on the surface. Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst. 2, No.4 18-42.
[4] Vidal G. Martín C., García Z. Eduardo, Guerrero F., Quintero G. David, 2024. Análisis de la infiltración de la lluvia en el valle de Las Tres Vírgenes y la interacción del agua subterránea en el acuífero profundo y el fluido termal en el campo geotérmico. Memorias del XXX Congreso anual de la Asociación Geotérmica Mexicana realizado en Morelia, México 23 y 24 de mayo de 2024.