

Estudio de microsismicidad en la Caldera La Reforma del complejo volcánico y geotérmico Las Tres Vírgenes, BCS

J.L. Pérez^{1*}, E. Gómez-Arias^{2,3}, L. Ávila-Barrientos^{2,3}, A. González-Fernández^{3,4} y J.G. Acosta-Chang⁴

¹Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, CICESE. ²Cátedras CONACYT – Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, CICESE. ³Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, CeMIE-Geo. ⁴División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, CICESE. * jhonper@cicese.edu.mx

Resumen

En este trabajo se muestran los resultados preliminares de la primera etapa del estudio de microsismicidad en la caldera La Reforma del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVLTV), BCS, el cual tiene como fin verificar y localizar la actividad sísmica, contribuyendo de esta manera a mejorar la comprensión de dicha estructura y observar si existe una relación entre la actividad sísmica y un posible escenario geotérmico. Para este propósito, se han establecido dos campañas de instrumentación sísmica. La primera se llevó a cabo entre los meses de septiembre y octubre de 2015, verificándose la existencia de microsismicidad en la caldera y presentándose en este trabajo los resultados preliminares.

Palabras clave: Caldera La Reforma, Red Sísmica, Microsismicidad, Geofísica.

Microseismicity survey at La Reforma caldera in the geothermal and volcanic complex of Las Tres Vírgenes, BCS

Abstract

This work presents preliminary results of the first stage of a microseismicity survey conducted at Caldera La Reforma caldera in the Volcanic Complex of Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, whose objective verify and locate microseismic activity. This will improve the understanding of this structure and allow define whether there is a relationship between seismic activity and a possible geothermal potential. For this purpose, we have established two seismic instrumentation campaigns. The first one took place throughout September and October 2015. It helped to prove the presence of microseismic activity at caldera Reforma, and this papers presents the preliminary results.

Keywords: La Reforma caldera, Seismic Network, Microseismicity, Geophysics.

Introducción

México actualmente ocupa el cuarto lugar en capacidad instalada para producción de energía eléctrica a partir de geotermia con 1,017 MWe (839 MWe en ejecución) que representa el 2.4% de la energía eléctrica del país (Bertani, 2015; Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015) y que se distribuye en cinco campos geotérmicos en funcionamiento: 1) Cerro Prieto, Baja California, con una capacidad de producción de 720 MWe, a partir de fluidos almacenados en areniscas terciarias; 2) Los Azufres, Michoacán, con una capacidad de producción de 194 MWe a partir de fluidos geotérmicos almacenados en rocas andesíticas del Mioceno-Plioceno; 3) Los Humeros, Puebla, con una producción de 93 MWe, con un

yacimiento alojado en andesitas terciarias; 4) Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, con una capacidad total de producción de 10 MWe, cuyo depósito geotérmico se encuentra alojado en granodioritas (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2005; Maya-González y Gutiérrez-Negrín, 2007; Gutiérrez-Negrín, 2012; Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015); y 5) Domo San Pedro en Tepic, Nayarit, con 10 MWe de producción, administrado por la empresa privada Grupo Dragón.

En 2014 se creó el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo) el cual tiene como objetivos estratégicos desarrollar proyectos de innovación tecnológica para contribuir a aprovechar el potencial geotérmico del país e impulsar el incremento de la producción de la energía eléctrica a través de nuevos yacimientos geotérmicos, así como desarrollar estudios para la localización de posibles sistemas geotérmicos mejorados (EGS) (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015; Romo-Jones, 2015). En este sentido, es imprescindible impulsar estudios de exploración y caracterización de nuevas zonas de explotación en los campos activos o localizar nuevos yacimientos, por lo que los diferentes métodos de exploración geofísica son fundamentales en el alcance de este propósito.

Los estudios de microsismicidad resultan ser una valiosa herramienta de exploración, pues a lo largo de fallas y fracturas en una zona geotérmica se crea la permeabilidad necesaria para que circulen fluidos geotérmicos, y precisamente la sismicidad que ocurre en estos sistemas es de utilidad en la identificación de las trayectorias de permeabilidad del yacimiento y anomalías térmicas (Wong, 2000).

Particularmente, en el Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV) se han realizado estudios de sismología orientados a: 1) determinar la distribución de las profundidades focales de microsismos que se han registrado bajo los volcanes, sugiriendo la presencia de una fuente de calor que alimenta el campo geotérmico a los 8 km de profundidad, además de correlacionar la actividad hidrotermal con la actividad microsísmica (Wong, 2000); 2) con base en el análisis de atenuación de las ondas de cuerpo, se sugiere la presencia de una corteza somera parcialmente saturada de fluidos; y 3) a partir de los valores obtenidos de las relaciones de Poisson (σ , 0.22 a 0.26), se sugiere saturación parcial de líquidos termales en los materiales de la zona de la caldera El Aguajito y en los volcanes El Viejo, El Azufre y La Virgen.

De acuerdo a los antecedentes, no se han reportado estudios de sismología en la caldera de La Reforma, que es parte del CVLTV, y por ello se consideró importante realizar uno con el objetivo de verificar y en su caso localizar la actividad microsísmica, contribuyendo a mejorar la comprensión de esta estructura y observar si existe una relación entre dicha actividad con un posible potencial geotérmico. Para este estudio de exploración, se diseñaron dos campañas de instrumentación sísmica. La primera se realizó entre el mes de septiembre y octubre de 2015, con la cual se verificó actividad microsísmica en la caldera y cuyos resultados preliminares se muestran en este trabajo. La segunda campaña está por llevarse a cabo en el mes de abril de 2016 para ampliar y mejorar el estudio en toda la caldera, con el fin de registrar un mayor nivel de actividad sísmica.

Zona de estudio

La caldera La Reforma es una parte relevante del CVLTV (Figura 1; todas las figuras al final del texto). Se localiza en el estado de Baja California Sur, en el municipio de Mulegé, cerca de las comunidades de Santa Rosalía y San Ignacio, a 35 km en dirección SE y 45 km al SW, respectivamente. El CVLTV se extiende sobre un área de ~900 km² con una elevación promedio de 720 msnm (Hiriart & Gutiérrez-Negrín, 2003; Tello-Hinojosa *et al.*, 2005). Tectónicamente el CVLTV se localiza dentro del dominio transtensional (*pull-apart*) del sistema de fallas laterales derechas que provocaron la separación de la península de Baja California hace aproximadamente 12 Ma (Fletcher *et al.*, 2007; Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2012).

La caldera La Reforma tiene una edad de 1.38 ± 0.03 Ma y un radio promedio de 10 kilómetros que incluye un domo resurgente de grandes proporciones formado debido a diferentes ciclos eruptivos muy complejos (Schmitt *et al.*, 2010). Después de un lapso de tiempo aún no definido se extravasaron por lo menos tres flujos piroclásticos principales en esta caldera. Los dos más antiguos aparentemente se depositaron en ambiente marino y el más reciente es sub-aéreo. La expulsión de este material pudo generar diferentes colapsos caldéricos en La Reforma, pero el último ciclo eruptivo (que se ubica entre 1.3 y 0.8 Ma) es el más visible. Esto se debe a que el núcleo de la estructura fue levantado como parte de un fenómeno resurgente, y está asociado a un nuevo aporte de magma y a movimientos isostáticos compensatorios (López *et al.*, 1993). Muestra de ello es la falla que bordea a esta caldera como un anillo debido precisamente al colapso gravitacional (Figuras 1 y 2).

Las primeras erupciones de tipo ignimbrítico que ocurrieron en el CVLTV fueron en las calderas El Aguajito y La Reforma en el Pleistoceno Temprano (Schmitt *et al.*, 2010). De acuerdo con las dataciones obtenidas en rocas del CVLTV, particularmente en minerales de zircón aplicando el método de la relación torio/uranio ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) y uranio-torio/helio (U-Th/He), se ha sugerido que el sistema magmático de esas dos calderas es independiente de la cámara magmática de los tres volcanes que le dan nombre al complejo (Schmitt *et al.*, 2010). Por otro lado, el CVLTV ha tenido diferentes procesos eruptivos violentos (emanación de piroclásticos) y no violentos (erupciones lávicas), lo que explica en gran medida el contraste de la composición geológica superficial en toda la zona (Schmitt *et al.*, 2010) (Figura 2).

Los flujos de caldera La Reforma cubrieron unos 100 kilómetros a la redonda, con espesores aproximados de 10 a 50 metros, que se encuentran radialmente inclinados desde el centro de la caldera. De los fenómenos principales asociados a la vida de la caldera se pueden mencionar los siguientes: flujos de pumicitas y depósitos de caída aérea, domos riolíticos pre-caldera, flujos piroclásticos (ignimbritas), derrames de andesitas, colapso y resurgencia como resultado del re-equilibrio hidrostático y domos post-caldera (Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988).

Metodología

Como parte de la primera campaña se instaló una red sísmica compuesta por cinco estaciones (Tabla 1 y Figura 3) con la cual se cubrió un 30% aproximadamente del área de la caldera.

No.	Latitud (N)	Longitud (W)	Elevación (m)
2	27°28.54'	112°27.07'	489
3	27°26.81'	112°24.43'	456
5	27°29.89'	112°26.11'	571
6	27°28.38'	112°25.06'	555
7	27°28.64'	112°23.66'	686

Tabla 1. Coordenadas de las estaciones sísmicas.

Cada estación sísmica está conformada por un sensor de periodo corto SARA (SS20), un digitalizador de 24 bits (SL06), dos baterías de ciclado profundo y una antena GPS para fijar el tiempo de los registros. Los datos adquiridos por la red fueron procesados mediante el software SEISAN (Ottemoller *et al.*, 2015), el cual utiliza como datos de entrada: el nombre de la estación, sus coordenadas

geográficas (latitud y longitud), elevación, lectura de los tiempos de arribo de las ondas P (T_p), S (T_s), la *Coda* o duración total del sismo (C), una relación de velocidad (V_p/V_s), un modelo de velocidad y una ecuación para el cálculo de la magnitud de duración.

Para determinar la localización de los eventos (latitud, longitud, profundidad y tiempo de origen) se usó un modelo de corteza local de 7 capas propuesto previamente (Tabla 2), una relación V_p/V_s de 1.68 estimada por Wong (2000) y para el cálculo de magnitud de duración (M_c) se utilizó un modelo propuesto previamente para eventos en la zona de Las Tres Vírgenes (Ecuación 1).

$$M_c = 1.81 * \log_{10}(T) + 0.0033 * D - 0.45 \quad (1)$$

Donde T es la duración total del sismo (en segundos) y D es la distancia epicentral (en kilómetros).

V_p (km/s)	Profundidad (km)
1.2	0.0
3.3	0.2
4.7	1.0
5.7	3.9
6.3	7.0
7.5	11.0
8.2	25.00

Tabla 2. Modelo de velocidades utilizado.

Para el análisis de los registros se consideraron los eventos cuya diferencia de arribo entre la onda P y la onda S fuera menor a 4s, descartando los eventos regionales y lejanos. La Figura 4 muestra un ejemplo del sismograma para el evento del 19 de septiembre de 2015 a las 2:50 hrs-UTC registrado en las estaciones 3 (156), 5 (142), 6 (147) y 7 (151), en la cual se puede observar el arribo de las ondas P , S y *Coda* (líneas rojas).

Resultados preliminares

Una vez realizado el análisis de los registros se logró localizar 13 eventos en la caldera (Tabla 3 y Figura 3). Las magnitudes de los eventos se encuentran entre 0.8-2.4 (M_c) y sus profundidades de foco varían entre 1 y 12 km. Los valores RMS de las lecturas observadas de P y S (para el conjunto de eventos) con respecto a las calculadas es de 0.1s, lo que indica buena calidad de las lecturas registradas. Sin embargo, dadas las limitaciones de cobertura de la red y los problemas técnicos que se presentaron en algunas estaciones, los resultados preliminares de localización tienen incertidumbres de error que merecen atención. Por ejemplo, para los eventos detectados dentro de la red (2, 11 y 13) los errores a nivel horizontal están en el rango de ± 1 km. A medida que los eventos se van distanciando de la cobertura de la red, los errores se van incrementando desde ± 2 km (eventos 1, 3 y 8) hasta ± 4 km (eventos 4, 5, 6, 7, 9, 10 y 12).

En cuanto a las profundidades (Tabla 3), para algunos eventos (1, 2, 8, 9, 11 y 13) ésta se fijó por defecto en 10 km, debido a la falta de información, necesaria para mejorar la localización focal y tener un mayor control sobre la misma, la cual depende del número de estaciones y su cobertura de la fuente sismogénica. No obstante, se obtuvieron buenas localizaciones de los eventos restantes (3, 4, 5, 6, 7, 10 y 12) ya que contaron con una mayor cobertura de estaciones, y sus profundidades varían entre 1 y 12 km. Las incertidumbres de error para las profundidades definidas por defecto son iguales a cero y en el resto presentan diferentes valores (Tabla 3) tanto en el sentido horizontal como en el vertical. Las Figuras 5 y 6 muestran dos perfiles (N-S y W-E), en los que se aprecian las incertidumbres de error

horizontal y vertical, respectivamente. También se puede observar que la mayoría de los eventos se concentran al oeste de la caldera, y se ubican entre 5 y 11 km de profundidad.

No.	Fecha	Hora UTC	Latitud (N)	Longitud (W)	Prof. (km)	Mc	RMS (s)	Error horizontal (±km)	Error vertical (±km)
1	17 sep	9:31	27.491	112.489	10	1.1	0.1	2.00	0
2	17 sep	12:17	27.480	112.440	10	0.8	0.1	0.75	0
3	18 sep	20:33	27.457	112.461	9.5	1.7	0.1	1.65	3.60
4	19 sep	2:50	27.580	112.490	7.6	1.3	0.1	3.15	2.70
5	19 sep	3:24	27.593	112.438	1.5	1.5	0.1	3.95	1.00
6	19 sep	3:51	27.583	112.456	1.0	1.3	0.1	2.90	2.70
7	19 sep	12:46	27.549	112.403	12	1.7	0.1	1.80	1.40
8	20 sep	0:02	27.519	112.469	10	1.3	0.1	2.10	0
9	22 sep	1:44	27.555	112.373	10	1.3	0.1	3.35	0
10	27 sep	10:17	27.528	112.378	1.2	1.3	0.1	3.05	1.00
11	29 sep	6:40	27.498	112.427	10	1.3	0.1	0.75	0
12	1 oct	15:15	27.458	112.363	12.4	1.6	0.1	1.95	5.30
13	6 oct	17:05	27.477	112.413	10	2.4	0.2	0.90	3.50

Tabla 3. Características generales de los eventos localizados.

Conclusiones

La sismicidad registrada en la caldera La Reforma en esta primera etapa del estudio tiene magnitudes que van desde 0.8 a 2.4 (*Mc*) y profundidades de 1 a 12 km. Los RMS de lecturas de *P* y *S* fueron de 0.1s para el conjunto de eventos, lo que indica una buena calidad de observación. No obstante, las incertidumbres de error en localización varían en promedio desde ± 1 km hasta ± 4 km tanto para la horizontal como la vertical. Básicamente dichas incertidumbres se asocian en gran parte a la limitada cobertura de la red y a las dificultades técnicas de los equipos. El modelo de velocidad también aporta un margen de error a las localizaciones y está ligado al RMS de las lecturas de *P* y *S* (observadas y calculadas).

La importancia de esta primera campaña radica en haber verificado que realmente hay microsismicidad en la caldera, por lo que la segunda campaña, que incluirá más estaciones, permitirá afianzar y mejorar este estudio en toda la caldera, registrando una mayor sismicidad y obteniendo ubicaciones más precisas de los eventos futuros. Esto ayudará a correlacionar dicha sismicidad con un posible potencial

geotérmico en la zona. A futuro se espera que las evidencias proporcionadas por esta investigación sirvan también como marco de referencia para otro tipo de estudios geofísicos en esta zona.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la División de Ciencias de la Tierra del CICESE y al CeMIE-Geo, por apoyar esta investigación. También se agradece al laboratorio de Procesamiento de Datos de Sismología Aplicada a la Ingeniería, a cargo del M.C. José Acosta Chang, por proporcionar los equipos, así como el entrenamiento técnico para el manejo de los mismos.

Bibliografía

- Bertani, R. (2015). Geothermal Power Generation in the World 2010 – 2014 Update Report. *Proceedings of the World Geothermal Congress, 2015*. Melbourne, Australia, April, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.10.001>.
- Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., & Gehrels, G. E. (2007). Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *Geological Society of America Bulletin*, 119(11-12), 1313–1336. <http://doi.org/10.1130/B26067.1>
- Gutiérrez-Negrín, L. (2012). Update of the Geothermal Electric Potential in Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, 36, 671–678.
- Gutiérrez-Negrín, L., Maya-González, R., & Quijano-León, J. (2015). Present situation and perspectives of geothermal in Mexico. *Proceedings of the World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, April 2015. energy.org/publications_and_services/latin_america_gateway.html?no_cache=1&cid=1066&id=798&sechash=f756eb41
- Gutiérrez-Negrín, L., & Quijano-León, J. (2005). Results of Geothermal Exploitation in Mexico in 2004. *Geothermal Resources Council Transactions*, 29, 1-7.
- Hiriart, G., & Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (2003). Main aspects of geothermal energy in Mexico. *Geothermics*, 32 4/6, 389-396.
- López, A., Casarrubias, Z., y Leal, R. (1993). Estudio geológico regional de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, BCS. CFE, Inédito.
- Macías-Vázquez, J., & Jiménez-Salgado, E. (2013). Estudio de estratigrafía y geología del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, BCS. *Geotermia*, 26(1), 14-23.
- Maya-González, R., y Gutiérrez-Negrín, L. (2007). Recursos geotérmicos para generar electricidad en México. *Revista Digital Universitaria*, 8(12), 13.
- Quijano-León, J., & Gutiérrez-Negrín, L. (2003). Mexican Geothermal Development. An Unfinished Journey. *Geothermal Resources Council Transactions*, 198–203.
- Romo-Jones, J., Wong-Ortega, V., Vázquez-González, R., y Flores-Luna, C. (2000). Conductividad eléctrica y atenuación de ondas de coda en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes en Baja California Sur. *Unión Geofísica Mexicana*, 20(1), 21–29.

- Romo-Jones, J. (2015). The Mexican Center for Innovation in Geothermal Energy (CeMIE-Geo). *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, April 2015.*
- Schmitt, A. K., Stockli, D. F., Niedermann, S., Lovera, O. M., & Hausback, B. P. (2010). Eruption ages of Las Tres Vírgenes volcano (Baja California): A tale of two helium isotopes. *Quaternary Geochronology*, 5(5), 503–511. <http://doi.org/10.1016/j.quageo.2010.02.004>
- Tello-Hinojosa, E., Verma, M. P., & González-Partida, E. (2005). Geochemical Characteristics of Reservoir Fluids in the Las Tres Virgenes , BCS , Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress*, (April), 24–29.
- Tello-López, M.R., & Torres-Rodríguez, M. A. (2015). Behavior of the Production Characteristics of the Wells in the Las Tres Vírgenes, B.C.S., Geothermal Field , México. *Proccedings World Geothermal Congress*, (April), 19–25.
- Vargas-Ledezma, H., y Garduño-Monroy, V. (1988). Estudio geológico de la caldera El Aguajito, B.C.S. CFE, Inédito.
- Wong, V. (2000). Estudio de sismotectónica, atenuación y tomografía sísmica en la región volcánica y geotérmica Las Tres Vírgenes. Tesis doctoral, CICESE, 1-184.

(Figuras en las páginas siguientes)

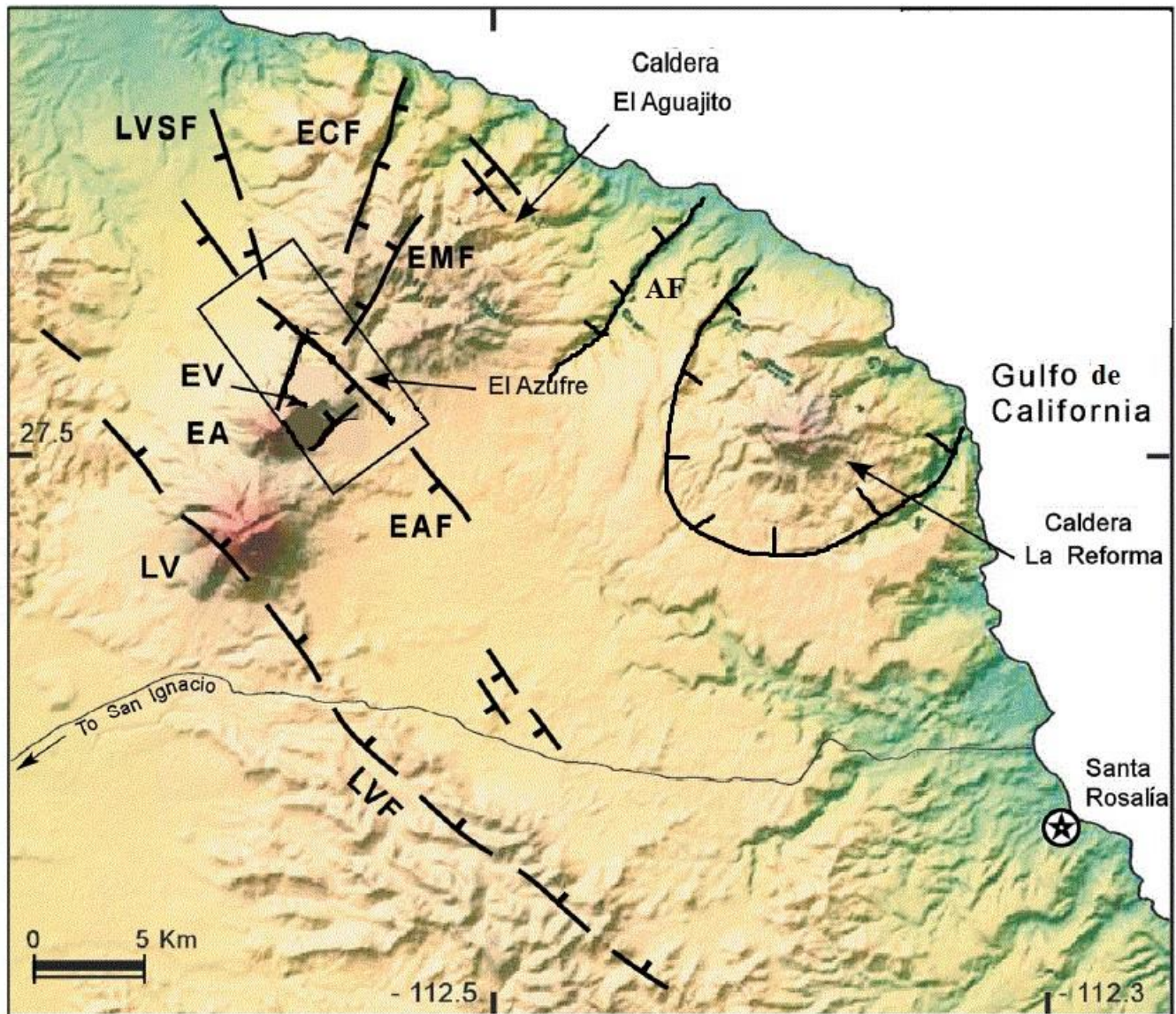


Figura 1. Mapa de fallas y estructuras principales en el CVLTV. la Virgen (LVF), El Azufre (EAF), El Cimarrón (ECF), Las Víboras (LVSF), El Mosquito (EMF), el Álamo (AF), Volcán El Viejo (EV), Volcán El Azufre (EA), Volcán La Virgen (LV) (modificado de Wong, 2010).

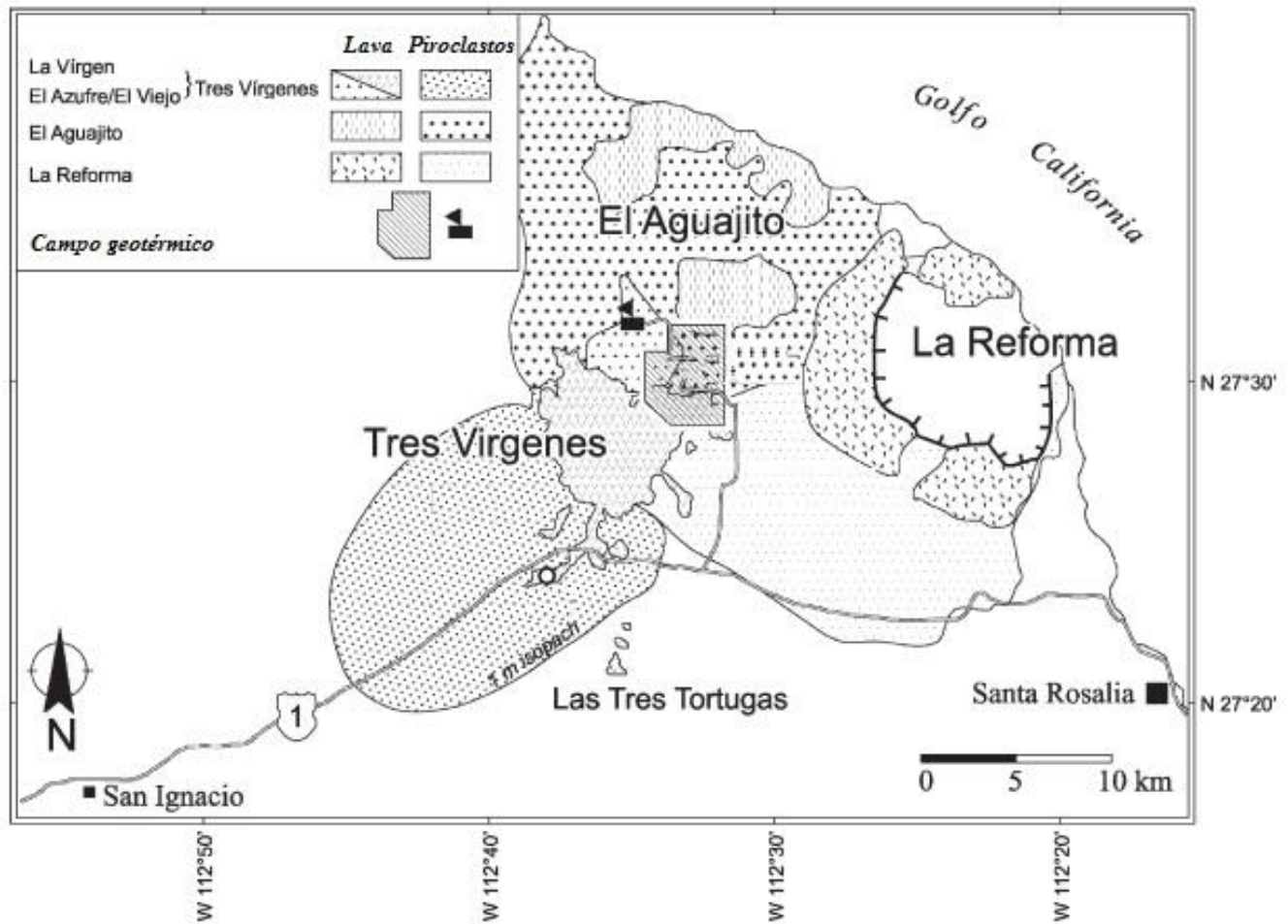


Figura 2. Mapa geológico del CVLTV (modificado de Schmitt et al., 2010).

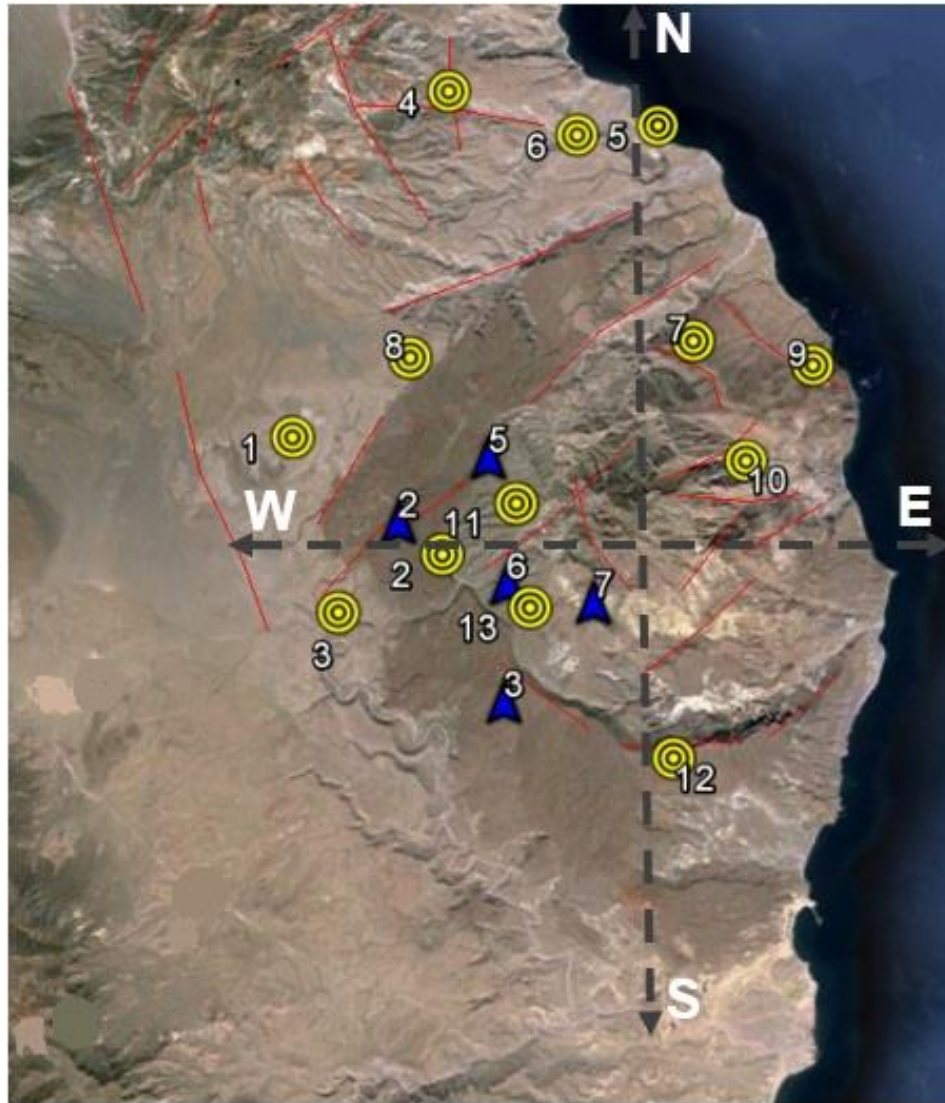


Figura 3. Ubicación de las estaciones sísmicas (triángulos azules) y eventos registrados (círculos amarillos). Las líneas rojas representan fallas, y las líneas negras segmentadas representan el corte de los perfiles S-N y W-E.

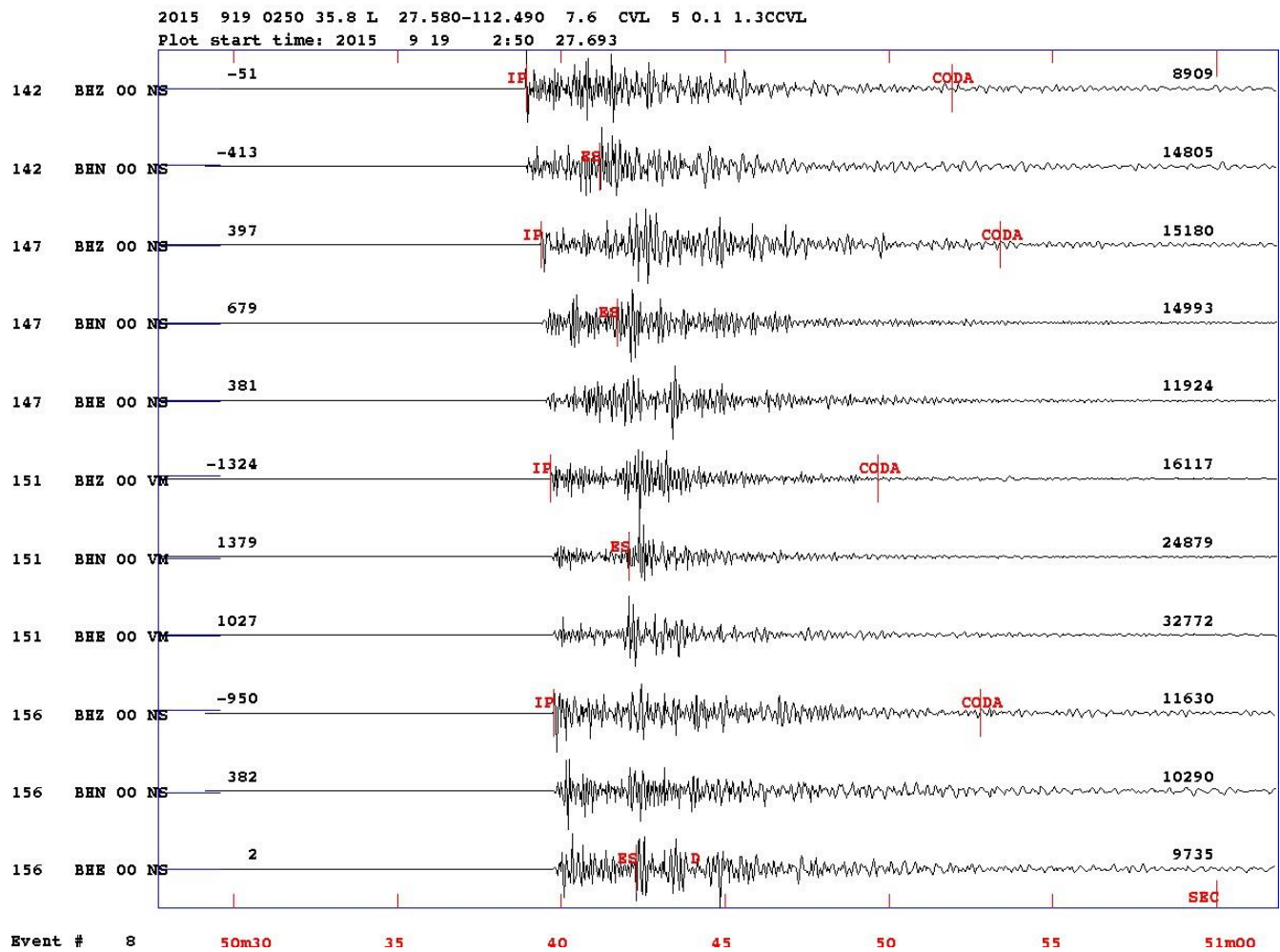


Figura 4. Registro sísmico del evento del 19 de septiembre de 2015 a las 2:50 hrs-UTC, registrado en las estaciones 3 (156), 5 (142), 6 (147) y 7 (151). Las líneas rojas representan las lecturas de las ondas P, S y Coda.

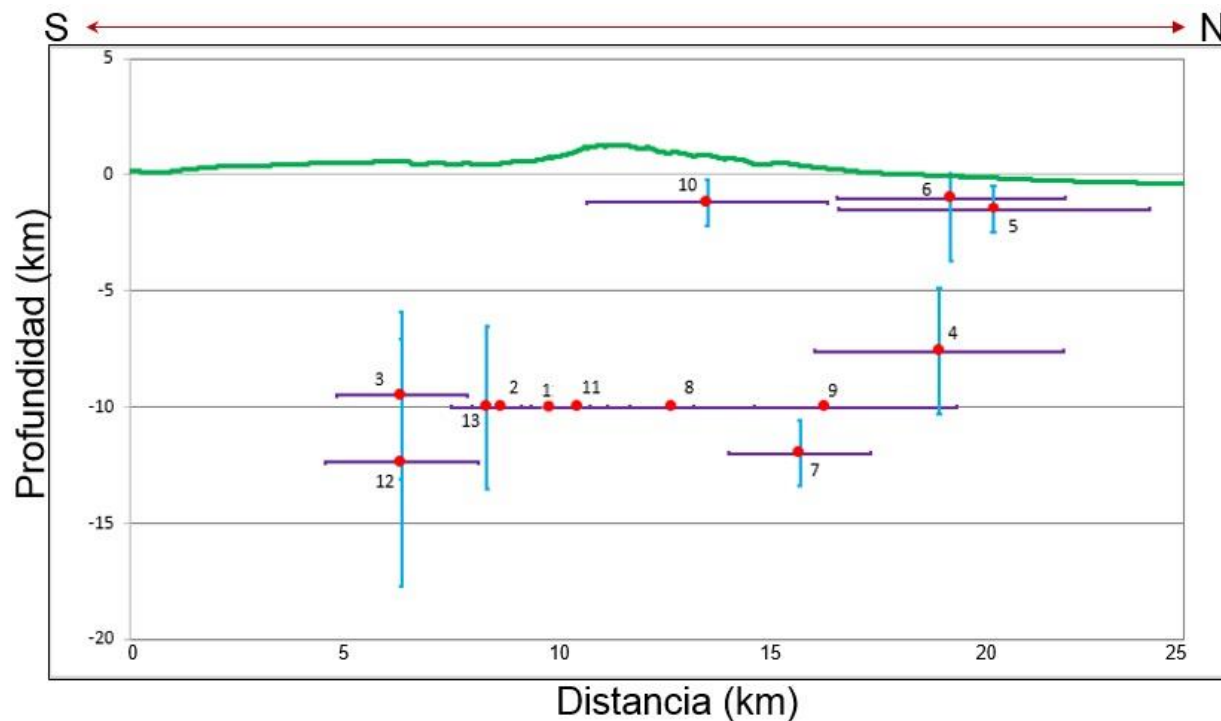


Figura 5. Perfil S-N. La línea verde es el perfil topográfico de la caldera, los puntos rojos son los eventos localizados, las líneas azules indican la incertidumbre de error en el nivel vertical, y las moradas la incertidumbre de error horizontal (para ubicación del perfil, ver Fig. 3).

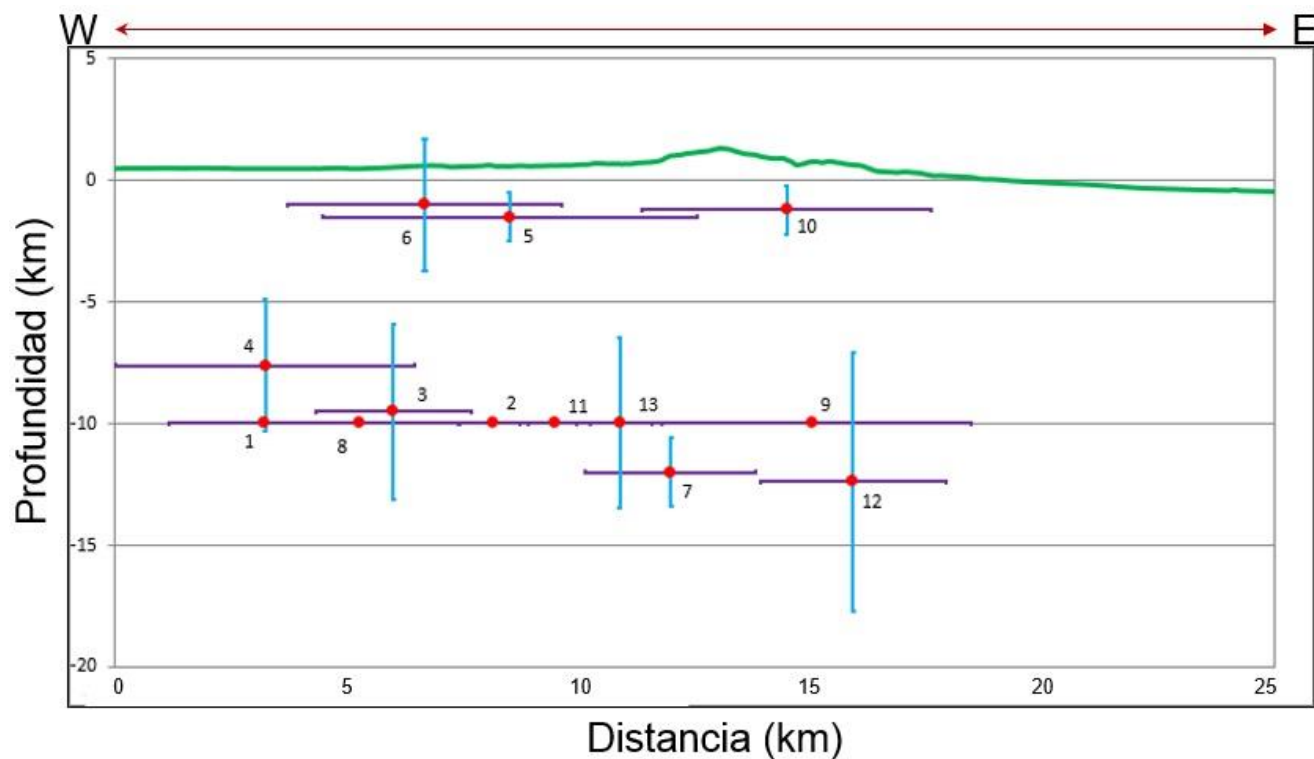


Figura 6. Perfil W-E. Símbolos iguales que en la Figura 5.