

# Quince años de monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS

*Irais Ortiz Prieto y Cecilia Lorenzo Pulido*

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich., México.

Correo: [cecilia.lorenzo@cfe.gob.mx](mailto:cecilia.lorenzo@cfe.gob.mx)

---

## Resumen

En el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, el monitoreo sísmico empezó a partir de 1992 con una sola estación analógica de registro vertical, la cual detectó una gran cantidad de temblores de distintas magnitudes. En febrero de 1993 se instaló una red sísmica con seis estaciones digitales DR-2000 con sensores S-6000 y S-5000, con tres canales de registro (N-S, E-W y vertical); esta fue la base para el desarrollo de un programa de correcciones a los datos de tiempo de arribo de las ondas P y S por deriva de los instrumentos. En los periodos enero-abril de 1994 y mayo-agosto de 1995 se registraron 170 eventos sísmicos, con lo que se propuso un modelo de velocidades, y de diciembre de 1995 a julio de 1996 se realizó un procesado e interpretación de datos sísmicos, definiendo las zonas de ocurrencia de eventos de acuerdo a sus magnitudes y caracterizando el ruido predominante en el campo. Entre septiembre de 2003 y diciembre de 2004 se instalaron diez estaciones sísmicas (temporales y permanentes) cuyo monitoreo permitió concluir que el sistema de fallas más activo era el de El Volcán. De septiembre a diciembre de 2004 se llevó a cabo un monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-4 y LV-13, lográndose definir dos zonas sísmicas de importancia asociadas al sistema de fallas El Volcán y al pozo inyector LV-8 y concluyéndose que existía un aumento de la actividad sísmica después de la inducción de los pozos. Entre mayo y agosto de 2006 se recopiló información de la red sísmica, con la cual se concluyó que el sistema de fallas más activo en ese periodo fue El Partido. Actualmente la red sísmica del campo consta de un equipo SARA y cuatro K2, y se ha conseguido que la estación SARA se comunique teleméricamente con la estación base.

*Palabras clave:* Geología estructural, Las Tres Vírgenes, monitoreo sísmico, modelo de velocidades, sismicidad.

## Fifteen years of seismic monitoring at the Las Tres Vírgenes, BCS, geothermal field

### Abstract

Seismic monitoring at the Las Tres Vírgenes, BCS, geothermal field started in 1992 with an analog station of vertical components detecting a large number of earthquakes of varying magnitudes. In February 1993, a seismic network was installed, composed of six digital stations DR-2000—with S-6000 and S-5000 sensors and three registration channels (N-S, E-W and vertical). This was the basis for the development of a program to correct arrival-time data for P and S waves due to instrument drift. From January to April 1994 and May to August 1995, based on the 170 seismic events recorded, a velocity model was proposed. From December 1995 to July 1996, seismic data were processed and interpreted, and zones of occurrence were determined for events according to magnitude and the predominant noise in the field. From September 2003 to December 2004, 10 seismic stations (permanent and temporary) were installed and monitored and it was concluded the most active fault system was El Volcán. From September to December 2004, production wells LV-4 and LV-13 were acid-stimulated and seismic monitoring during this period allowed for the definition of two important seismic zones, both related to the El Volcán fault system and to injection well LV-8. After

reopening these production wells, it was concluded an increase in seismic activity had occurred. From May to August 2006, information was compiled from the seismic network and it was concluded El Partido had become the most active fault system. Presently the seismic network in this field is composed of one SARA station and four K2 units. The SARA station is telemetrically connected to the base station.

**Keywords:** Structural geology, Las Tres Vírgenes, seismic monitoring, velocity model, seismicity.

## Introducción

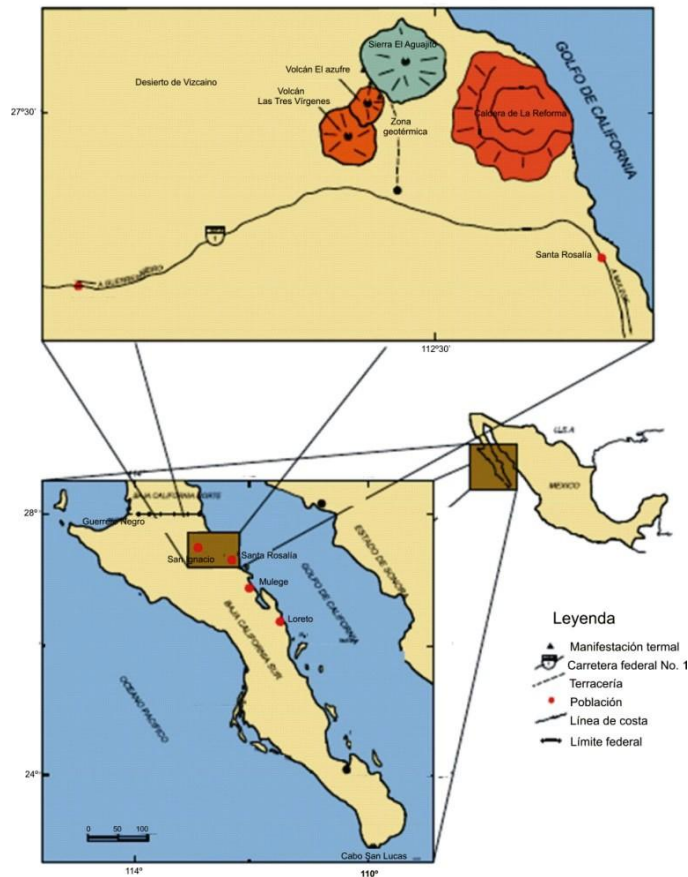


Fig. 1. Localización de Las Tres Vírgenes

2), de las cuales sobresalen las fallas El Azufre, La Virgen, El Viejo y El Partido. La anomalía térmica coincide con la intersección de este sistema de fallas NW-SE con el sistema Cimarrón de dirección N-S (Lermo *et al.*, 2006).

El campo está dentro de un complejo volcánico compuesto por tres estratovolcanes de edad cuaternaria: El Azufre, El Viejo y La Virgen; la fuente de calor parece estar asociada con la cámara magmática de este último volcán, que se ubica más al sur y es el más reciente de los tres.

La geología del subsuelo muestra un basamento granítico del Cretácico, con una edad de 80 Ma; a este lo sobreyace el Grupo Comondú, que es una secuencia vulcano-sedimentaria con un espesor máximo de 750 m, cuya edad comprende del Oligoceno Tardío al Mioceno Medio.

El objetivo de este trabajo es presentar la información sísmológica obtenida a lo largo del tiempo en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, así como su utilización en la mejor comprensión de las características y comportamiento del sistema geotérmico, particularmente de los rasgos estructurales del campo. Con ello se confirma que los estudios sísmológicos resultan ser un elemento fundamental para la investigación y desarrollo de zonas de producción en proyectos de generación geotermoeléctrica.

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes se encuentra localizado en el extremo este de la Península de Baja California Sur, comprendido entre las coordenadas  $27.40^{\circ}$  N a  $27.59^{\circ}$  N y  $112.40^{\circ}$  W a  $112.67^{\circ}$  W (Figura 1).

Desde el año 2001 se encuentran operando dos unidades turbogeneradoras a condensación de 5 MW netos cada una, operadas, al igual que las instalaciones del campo geotérmico, por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

La tectónica de la zona está fuertemente influenciada por fallas y vulcanismo reciente y activo; se caracteriza por fallas con dirección NW-SE (Figura

Sobre el grupo anterior se encuentra la formación Santa Lucía, cuyo espesor máximo es de 300 m, y está compuesta por derrames del volcán El Azufre alterados a profundidad, ignimbritas y sedimentos marinos de edad del Mioceno Tardío al Cuaternario Temprano. Encima de esta se encuentran sedimentos marinos de la Cuenca Santa Rosalía, de 54 m a 258 m de espesor, formados por conglomerados y areniscas, con dacitas submarinas. Le sobreyacen las Ignimbritas Aguajito, de 3 m a 187 m de espesor, las ignimbritas y dacitas El Viejo (de 65 m a 213 m de espesor) compuesta por dacitas de augita, además de andesitas del complejo Las Tres Vírgenes con depósitos aluviales.

### Periodo 1992-2000

La sismica pasiva es un método geofísico muy aplicable a la geotermia, ya que permite localizar e inferir fallas y fracturas geológicas a profundidad, a través de las cuales ascienden los fluidos geotérmicos a la superficie. Por ello, aunque de manera interrumpida, desde 1992 se ha llevado a cabo un monitoreo sísmico en el campo de Las Tres Vírgenes.

El primer monitoreo se hizo en un periodo de seis meses, de mayo a noviembre de 1992, con una sola estación analógica de registro vertical (Wong y Munguía, 1992). En esta primera etapa se detectó una gran cantidad de sismos de distintas magnitudes y a diferentes distancias de la estación instalada.

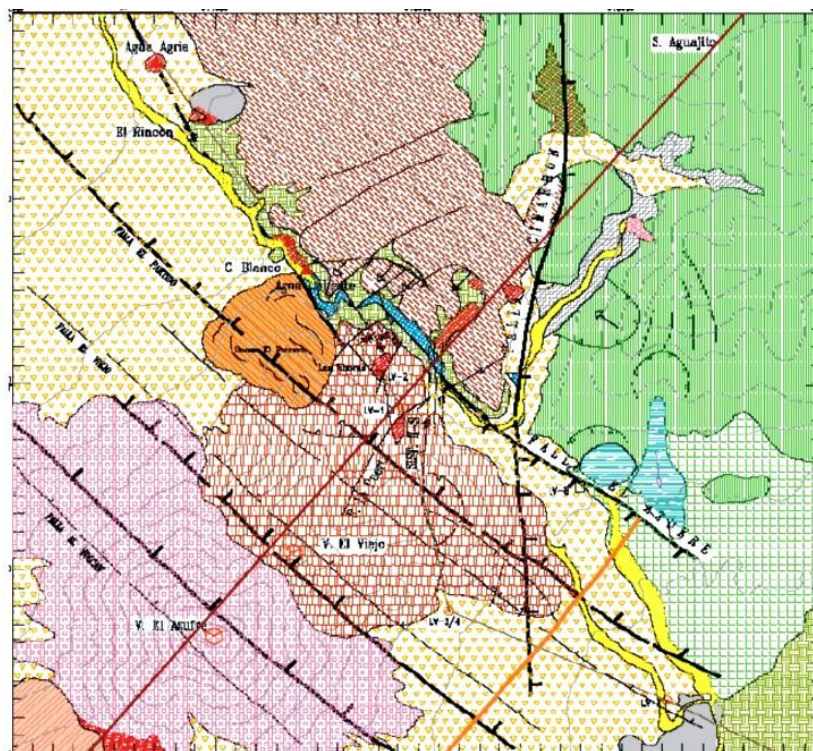


Fig. 2. Bosquejo geológico del campo de Las Tres Vírgenes, destacando las fallas de dirección NW-SE y N-S

La zona estudiada en esa ocasión se consideró de muy alta actividad sísmica, ya que reportó un promedio de 30 a 40 eventos por día. Los eventos tectónicos de origen local que se registraron tuvieron una magnitud entre 0 y 3, con eventos pequeños de magnitud 0 a 1 asociados a estructuras volcánicas próximas a la estación. Una de las principales conclusiones de ese primer estudio fue que tanto las estructuras tectónicas como las volcánicas se encontraban activas, provocando los patrones de ocurrencia observados.

Debido a los resultados obtenidos, en febrero de 1993 la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE decidió instalar una red sísmica en un área de 200 km<sup>2</sup>. El equipo utilizado incluyó grabadoras digitales DR-2000, Sprengnether, con sensores S-6000, con una frecuencia natural a 2 Hz, y sensores S-500 de frecuencia natural a un segundo. Las estaciones registraban tres componentes del movimiento del terreno, dos horizontales en dirección N-S y E-W, y una vertical.

En el periodo de enero a abril de 1994 se llevó a cabo un análisis e interpretación sísmica registrada en el campo (Macías-Carrasco, 1996). Con ello se generaron archivos en computadora, y se diseñó un programa en Fortran para realizar la corrección a los datos de tiempo de arribo de las ondas P y S, por deriva interna de los instrumentos.



Tomando en cuenta esa probable relación entre la frecuencia de los sismos locales y la producción de vapor e inyección de agua, en el periodo de septiembre a diciembre de 2004 se realizó un monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-13 y LV-4, que fueron intervenidos a fines de septiembre de 2004 a fin de mejorar su producción. El objetivo era observar la distribución temporal y espacial de la actividad sísmica provocada por la acción de la estimulación ácida, principalmente en las fallas o sistema de fallas de El Viejo (antes falla El Azufre), El Partido, El Azufre (antes falla Cañón del Azufre) o en otras zonas.

Con la información recabada se concluyó que hubo un aumento en la actividad sísmica en la zona donde se encuentra el sistema de fallas El Volcán (Fig. 3), identificada como zona A, por efecto de la inducción y la nueva puesta en operación de los dos pozos con una mayor producción de vapor, situación que no ocurrió al empezar el enfriamiento de los pozos como paso previo a la estimulación ácida (Lermo *et al.*, 2004). La cantidad de sismos detectada y las diversas actividades relacionadas con la estimulación de ambos pozos se presenta en la Figura 4.

En la zona ubicada cerca del pozo inyector LV-8 (Fig. 3), identificada como zona B, el efecto del inicio de enfriamiento de los dos pozos sí cambió el número de sismos que se originan en esa zona, registrándose un aumento de 6 sismos por día, y disminuyendo después. También en esta zona ocurrió un aumento de la actividad sísmica después de la inducción y nueva puesta en operación de los dos pozos productores teniendo un máximo de 11 sismos por día a fines de noviembre de 2004, como se puede observar en la Figura 4 (Lermo *et al.*, 2004).

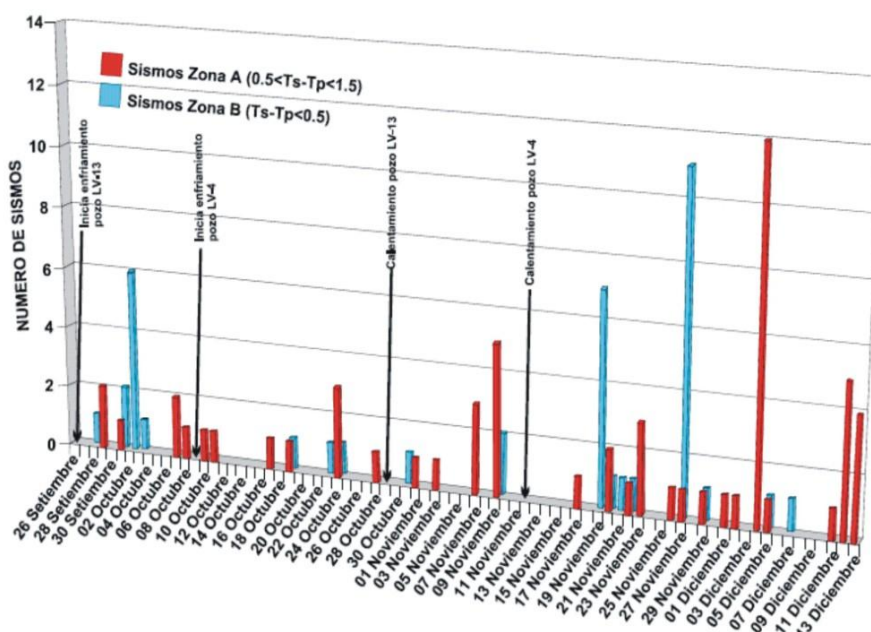


Fig. 4. Número de sismos originados antes, durante y después de la estimulación ácida de los pozos LV-4 y LV-13 (Lermo *et al.*, 2004).

Cabe destacar que el sistema de fallas El Viejo no presentó ningún sismo en ese periodo (Lermo *et al.*, 2004), lo que es importante tomar en cuenta al proponer nuevos pozos productores en esta zona.

De mayo a agosto de 2006 se llevó a cabo otro monitoreo sísmico por medio de sismógrafos digitales de banda ancha. Se logró registrar más de 50 sismos locales y 32 regionales, 23 de los cuales se ubican en la Figura 5, además de muchas más señales de tipo volcánico. Se definieron tres zonas sísmicas (A, B y C), como se muestra en la misma Figura 5.

Los sismos ubicados en la zona A fueron originados en el sistema de fallas El Volcán. Los localizados en la zona B están asociados a la falla El Partido, y se agrupan en un lineamiento que se puede interpretar como el echado de esta falla, lo que parece indicar que ahora esta es la falla más activa del campo. Los sismos ubicados en la zona C se asocian con el volcán La Virgen, el más meridional y reciente del complejo, y particularmente con la falla del mismo nombre. Las secuencias sísmicas detectadas permitieron delinear la zona de falla de la falla La Virgen.

Durante el año 2006 el pozo LV-13D se desvió hacia la falla El Viejo, con la finalidad de interceptar las zonas permeables relacionadas a esta falla; para ello se empleó la información sísmica registrada en el campo (CFE, 2006).

En la actualidad la red sísmica permanente en el campo está constituida por cuatro acelerógrafos K2 y un equipo SARA, este último enlazado con telemetría a la estación central, lo que permite lecturas en tiempo real.

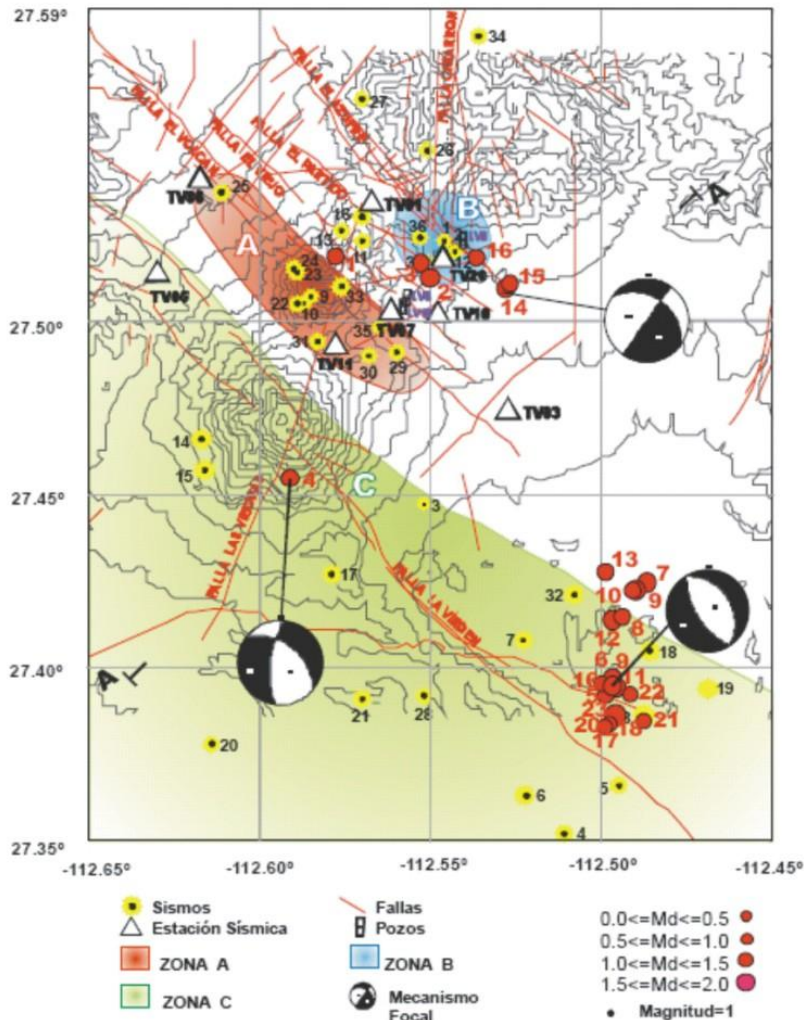


Fig. 5. Distribución espacial de la actividad sísmica en Las Tres Vírgenes durante los periodos Septiembre 2003-Diciembre 2004 (círculos amarillos con puntos negros) y Mayo-Agosto 2006 (círculos rojos), mecanismos focales y zonas sísmicas (Lermo et al., 2006).

Mientras la red sísmológica se mantenga activa se contará con información valiosa para realizar los estudios de sísmica pasiva que, junto con los estudios de geología, geoquímica, e ingeniería de yacimientos, hacen posible la explotación racional del yacimiento y la propuesta de futuras zonas de expansión.

Adicionalmente, la adquisición de nuevos equipos permitiría cubrir el campo de una forma más completa y contar así con mayor información para una mejor interpretación sísmológica.

## Conclusiones y recomendaciones

Se han descrito brevemente los estudios de sismología realizados en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, pudiéndose observar el avance que ha tenido la red sísmológica y sus aportes para el crecimiento y desarrollo del campo.

En resumen, a partir de la interpretación de los datos obtenidos en los diversos monitoreos sísmicos realizados en el campo de Las Tres Vírgenes y sus alrededores, puede establecerse que la sismicidad local parece presentar tres fuentes: una asociada a las trazas de las fallas La Virgen (particularmente en su extremo sureste) y El Azufre (Rodríguez, 1999), otra al sistema de fallas El Volcán (Lermo et al., 2004), y una más al sistema de fallas El Partido, que parece ser el más activo actualmente (Lermo et al., 2006).

Entre otras aportaciones, lo anterior indica la importancia de mantener la red en condiciones de operación y de mejorarla mediante su enlace total con telemetría, para estar en posibilidades de monitorear el campo de una forma más accesible y oportuna.

## **Referencias**

- Comisión Federal de Electricidad, 2006. Monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S. CFE, informe interno No. GF-TV-01-06. Inédito.
- Guerrero-Guadarrama, J.L., 1996. Red sismológica del campo geotérmico de Tres Vírgenes, B.C.S. Reporte de la actividad sísmica registrada en los periodos enero-abril de 1994 y mayo-agosto de 1995. CFE, informe interno de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.
- Lermo, J., Y. Antayhua, I. Bernal, M. Chavacán y D. Vega, 2004. Monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-13 y LV-4 localizados en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe elaborado para la CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.
- Lermo, J., Y. Antayhua, G. Espitia y C. Flores, 2006. Monitoreo sísmico en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe elaborado para la CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.
- Lermo J., Y. Antayhua, L. Quintanar y C. Lorenzo, 2008. Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos. *Geotermia*, Vol. 21, No.1, pp. 25-41.
- Macías-Carrasco, M., 1996. Análisis e interpretación de la información sísmica digital registrada en el campo geotérmico de Tres Vírgenes, B.C.S., durante el periodo enero-abril de 1994. Reporte informativo. Inédito.
- Rodríguez, M., 1999. Procesado e interpretación de datos sísmicos registrados en zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S., en el periodo diciembre 1995-julio 1996. Instituto de Ingeniería, UNAM. Inédito.
- Wong, V., y L. Munguía, 1992. Monitoreo sísmico del área geotérmica de Las Tres Vírgenes, Baja California Sur. Informe técnico final para la Comisión Federal de Electricidad. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Reporte interno. Inédito.