



XVIII Congreso Peruano de Geología

PARÁMETROS DE FUENTE DE LOS SISMOS REGISTRADOS EN EL CAMPO VOLCÁNICO Y GEOTÉRMICO DE LAS TRES VÍRGENES (BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO)

Yanet Antayhua^{1,2}, Javier Lermo² y Oscar Campos¹

¹ Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México (yantayhua@gmail.com)

² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México

1. Introducción

Uno de los objetivos de los estudios sismológicos es conocer los parámetros de fuente; tales como momento sísmico (M_0), la frecuencia esquina (F_c), el radio de fractura (R), la caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) en megapascuales (MPa), la magnitud de momento (M_w) a fin de establecer la ley de escalamiento del espectro sísmico. De acuerdo a esta ley, la caída de esfuerzo para sismos tectónicos regionales y locales, incluido los inducidos por procesos volcánicos y geotérmicos, fracturamiento hidráulico, explotación de minas (Goertz-Allman et al., 2011; Mandal et al., 1998; Mukuhira et al., 2013), entre otros, deben exhibir incrementos y disminución de la frecuencia esquina con respecto al momento sísmico (Aki, 1967; Scherbaum & Kisslinger, 1984; Abercrombie, 1995). Sin embargo, la estimación de los parámetros de fuente para sismos locales y/o inducidos con magnitudes menores a 3 grados, difieren con respecto a los resultados convencionales. En este contexto, a fin de establecer cuál es la ley de escalamiento que rige a la sismicidad del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), se analizan 321 sismos.

El Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) (Figura 1) que genera 10 MW de energía eléctrica por la explotación del recurso geotérmico. La CVGTV se encuentra en la Península de Baja California, porción norte del estado de Baja California Sur y a 34 km NW de la ciudad de Santa Rosalía (Figura 1a). Su nombre proviene de la alineación, en dirección NE-SW, del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) compuesto de tres volcanes: El Viejo, El Azufre y La Virgen (López et al., 1994; Capra et al.,

1998). Este complejo volcánico es el más joven comparado con las estructuras volcánicas de La Reforma (RE) y El Aguajito (AG) (Garduño-Monroy et al., 1993) (Figura 1).

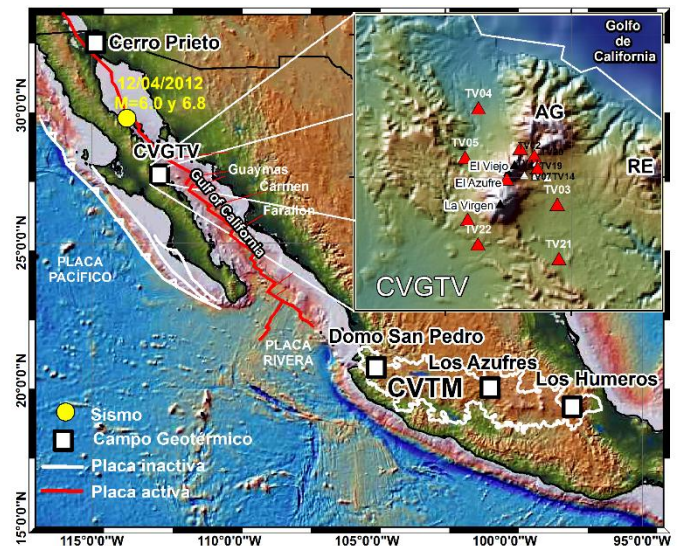


Figura 1. Ubicación geográfica de los campos geotérmicos de México. Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV). El polígono en blanco representa al Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVM). AG= Caldera El Aguajito; RE= Caldera La Reforma. Los triángulos en color rojo son las estaciones sísmicas que registraron la sismicidad del periodo 2003-2013.

2. Sismicidad y parámetros de fuente

La sismicidad del CVGTV se caracteriza por presentar enjambres asociados, principalmente, a los procesos de

inyección de agua al yacimiento geotérmico y a la tectónica local (Antayhua et al., 2015) (Figura 1a y 1b). Estos sismos registrados con más de 4 estaciones (Figura 1) presentan magnitudes de coda pequeñas ($M_c < 3.0$) y profundidades menores a 10 km (Figura 2a).

Para estimar los parámetros de fuente de 321 sismos de un total de 575 sismos ocurridos en el CVGTV, entre el 2003 y 2013 (Figura 2), se utilizaron los algoritmos "Spec" y "Getstressdrop" del conjunto de algoritmos del programa SEISAN v. 10.3 (Otemöller et al., 2015) y las ecuaciones propuestas por Brune (1970), Hanks & Kanamori (1979), Eshelby (1957) y Madariaga (1976).

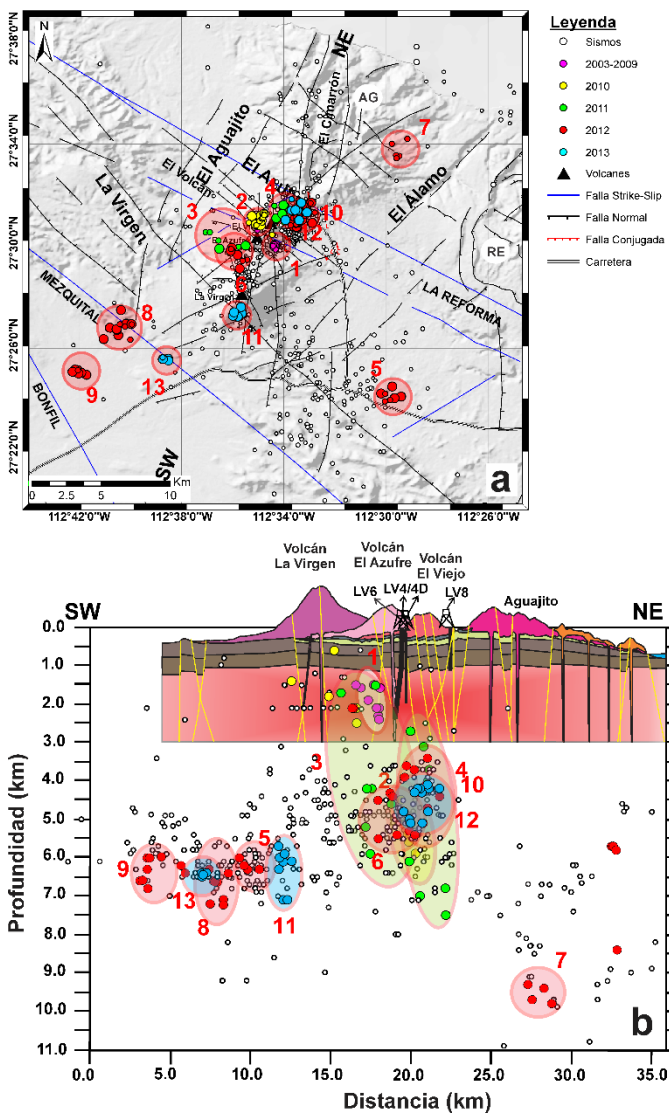


Figura 2. a) Distribución de la sismicidad ocurrida en el CVGTV. a) Distribución espacial y b) en profundidad, siguiendo la dirección preferencial SW-NE del perfil estratigráfico de Benton et al. (2011). AG= Caldera El Aguajito; RE= Caldera La Reforma.

2.1. Parámetros de fuente

En la Figura 3 se presenta la variación temporal de los parámetros fuente estimados para 321 sismos. Los resultados muestran que los valores del momento sísmico (M_o) varían entre $2.4E+9$ y $1.3E+13$ Nm, con un valor

máximo de $1.1E+13$ Nm estimado para el sismo registrado el 17 de junio de 2013. Los valores de $\Delta\sigma$ oscilan entre 0.0015 y 3.26 MPa.

En cuanto a la magnitud de momento (M_w), varía entre 0.2 y 2.5 M_w . Estas magnitudes son relativamente más pequeñas que los estimados con la magnitud de coda (M_c). Con respecto a R, los valores varían entre 37.7 y 213 m. Sin embargo, durante los días 12-18 de abril de 2012 y 17-23 de junio de 2013 se presentaron incrementos importantes en los valores de los parámetros de fuente. El primero corresponde a los enjambres de sismos 6 y 7 (ver Figura 2) registrados después de la ocurrencia de los 2 sismos regionales con magnitudes $M=6.0$ y $M=6.8$ (12 de abril de 2012; Figura 1) y el segundo, fue estimado para el enjambre 11 y los sismos localizados entre la caldera El Aguajito y el Golfo de California, zona donde los sismos tienen magnitudes y profundidades mayores (ver Figura 2).

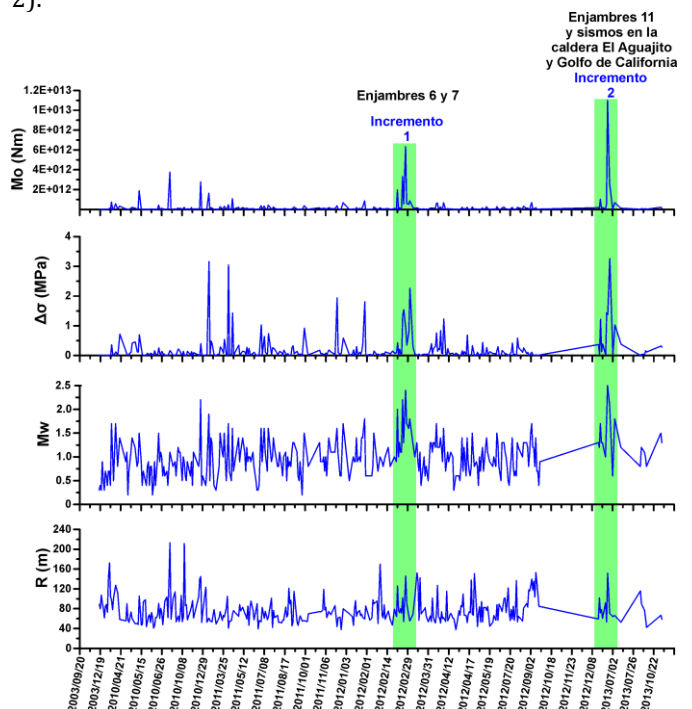


Figura 3. Evolución temporal de los parámetros de fuente de 321 sismos. Los recuadros en color verde muestran los periodos de incrementos de estos parámetros. M_o =momento sísmico (Nm); M_w =magnitud de momento; $\Delta\sigma$ =caída de esfuerzo (MPa) y R =radio de fractura (m).

La relación entre los parámetros de fuente estimados en este estudio son presentados en la Figura 4. En general, la relación M_o versus F_o (Figura 4a) no muestra una correlación directa entre incrementos de ambos parámetros. La correlación se presenta solamente entre $\Delta\sigma$ versus M_w (Figura 4b) y $\Delta\sigma$ versus profundidad de los sismos (Figura 4c). Sin embargo, es evidente que la dimensión de la fuente, no sigue el patrón de la caída de esfuerzo constante o ley de escalamiento del espectro sísmico (Figura 4d), además los valores de $\Delta\sigma$ son bajos en aproximadamente 3 órdenes de magnitud con relación a los sismos tectónicos (entre 0.0015 y 3.16 MPa). Esto se debe a que en el CVGTV están presentes los efectos de la circulación de fluidos, gases, altas temperaturas que

pueden modificar, significativamente, el estado de esfuerzos; por lo tanto, no cumple la ley del escalamiento constante. Similares resultados fueron evidenciados por

Del Pezzo et al. (2004), Kwiatak et al. (2010) y Goertz-Allmann et al. (2011), en el volcán Vesubio (Italia) y en el campo geotérmico de Basel (Suiza).

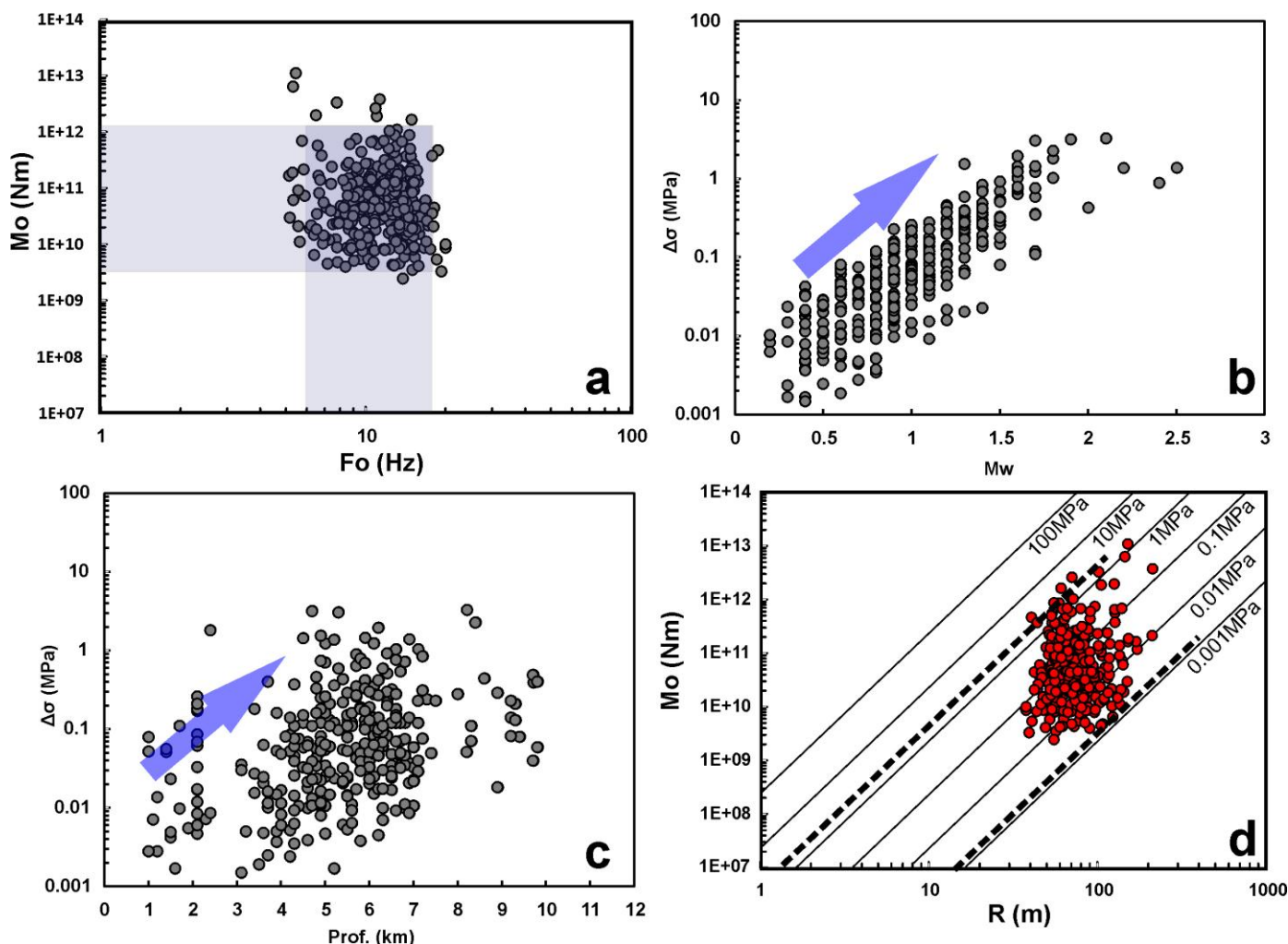


Figura 4. Correlación de parámetros de fuente de 321 sismos registrados en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes. a) Momento sísmico (M_o) versus frecuencia esquina (F_o); b) Caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) versus magnitud de momento (M_w); c) Caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) versus profundidad de los hipocentros y, d) Caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) versus radio de fractura (R). Las líneas diagonales son constantes de caídas de esfuerzo calculados del modelo de Madariaga (1976), las líneas discontinuas delimitan el rango de caída de esfuerzo registrado en el CVGTV. Obsérvese la no-linealidad de la ley de escalamiento del M_o y R . Las flechas en color azul muestran incrementos de la $\Delta\sigma$ con la magnitud y profundidad de los sismos.

3. Conclusiones

Del análisis de los parámetros de fuente de 321 sismos ocurridos en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), México, se concluye que:

- 1) El momento sísmico (M_o) y la frecuencia esquina (F_o) no muestran correlación directa.
- 2) La correlación se observa entre el momento sísmico (M_o) versus magnitud de momento (M_w) y en la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$) versus la profundidad de los sismos.
- 3) Los valores de caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) exhiben 3 órdenes de magnitud con relación a los sismos tectónicos.
- 4) La dimensión de la fuente de los sismos del CVGTV, no sigue el patrón de la caída de esfuerzo constante o ley de escalamiento del espectro

sísmico debido a los efectos de la circulación de fluidos, gases, altas temperaturas que modifican, significativamente, el estado de esfuerzos en la zona de estudio.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al Posgrado en Ciencias de la Tierra, al Instituto de Geofísica y al Instituto de Ingeniería. A CONACyT y al proyecto PAPIIT (IN110813). A la Comisión Federal de Electricidad (CFE), por permitirme el uso de los datos e información bibliográfica previa.

Referencias

Abercrombie, R.E. 1995. Earthquake source scaling relationships from -1 to 5 ML using seismograms

- recorded at 2.5-km depth, *Jour. Geophys. Res.* 100: 24015-24036.
- Antayhua-Vera, Y., Lermo-Samaniego, J., Quintanar-Robles, L. & Campos-Enríquez, O. 2015. Seismic activity and stress tensor inversion at Las Tres Vírgenes Volcanic and Geothermal Field (México). *Jour. of Vol. and Geother. Res.*, 305, 19-29. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.08.005.
- Benton, A., García, F., Silis, J. & Cruz, S. 2011. Estudio geohidrológico de la cuenca de Las Tres Vírgenes, B.C.S. Gerencia de Proyectos Termoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad. INFORME DEX-DGL-TV-16-11. 196 p.
- Brune, J. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Jeophys. Res.* 75: 4997-5009.
- Capra, L, Macías, J. L., Espíndola, J. M. & Siebe, C. 1998. Holocene plinian eruption of La Virgen volcano, Baja California, Mexico. *Jour. Vol. Geother. Res.* 80: 239-266.
- Del Pezzo E., Bianco, F. & Saccorotti, G. 2004. Seismic source dynamics at Vesuvius volcano, Italy. *Journal of Vol. and Geother. Res.*, 133, 23-39.
- Eshelby, J. 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 241 (1226), 376-396.
- Goertz-Allmann, B. P., Goertz, A. & Wiemer, S. 2011. Stress drop variations of induced earthquakes at the Basel geothermal site, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09308, doi:10.1029/2011GL047498.
- Hanks, T.C. & Kanamori, H. 1979. A moment magnitude scale, *d. Geophys. Res.*, 84: 2348-2350.
- Kwiatek, G., Bohnhoff, M., Dresen, G., Schulze, A., Schulte, T., Zimmermann, G., Huenges, E. 2010. Stress drop variations of induced earthquakes at the Basel geothermal site, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09308, doi:10.1029/2011GL047498.
- López, H., García, H., y Arellano, G. 1994. Geological and geophysical studies at Las Tres Vírgenes B.C.S., Mexico, geothermal zone, *Geotherm. Res. Counc. Trans.* 18: 275-280.
- Madariaga, R. 1976. Dynamics of an expanding circular fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66 (3): 639-666.
- Otemöller, L., Voss, P. & Havskov, J. 2015. Seisan Earthquake Analysis Software. <http://seisan.info> 423 p.
- Scherbaum, F. & Kisslinger, C. 1984. Variations of apparent stresses and stress drops prior to the earthquake of 6 May 1984 (mb= 5.8) in the Adak seismic zone. *Seism. Soc. of Am.* 74 (6): 2577-2592.