

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y ATENUACIÓN DE ONDAS DE CODA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO LAS TRES VÍRGENES EN BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

José M. Romo-Jones, Víctor Wong-Ortega, Carlos Flores-Luna y Rogelio Vázquez-González

División de Ciencias de la Tierra, CICESE,

Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C., 22860, México

RESUMEN

Los datos obtenidos mediante una red sismológica en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, así como los resultados de varias campañas geofísicas que incluyen los métodos magnetoteléurico (MT), transitorios electromagnéticos (TDEM) y resistividad con corriente directa (Schlumberger), nos permiten delinear zonas donde la conductividad eléctrica y la atenuación de las ondas elásticas son particularmente altas. En este trabajo presentamos resultados de dos estudios independientes. En uno de ellos se utilizan las ondas de coda de sismos locales para estimar la atenuación que sufren las ondas al viajar a lo largo de distintas trayectorias del subsuelo. En el otro, se usan los datos magnetoteléuricos medidos en 90 sitios y resultados de otras campañas geofísicas para estimar la conductividad eléctrica del subsuelo entre la superficie y 3 km de profundidad. Los resultados sugieren que a lo largo del Cañón El Azufre, el cual representa la frontera entre el complejo volcánico Las Tres Vírgenes y la caldera El Aguajito, existe una región del subsuelo en donde la conductividad eléctrica y la atenuación de las ondas elásticas son anormalmente altas. Se cree que la presencia de rocas intensamente fracturadas así como los fluidos con alta temperatura pueden incrementar substancialmente la conductividad eléctrica y la atenuación de las ondas sísmicas. En esa zona encontramos que el factor de calidad Q_c sufre una reducción significativa a bajas frecuencias, lo que se traduce en valores de atenuación 3 o 4 veces mayores a los estimados en el resto del área. Por otra parte, en la misma zona encontramos resistividades menores de $5 \Omega\text{-m}$ a profundidades entre 250 y 2500 m. Ambos resultados concuerdan con el conocimiento actual de la geología del subsuelo que ha comprobado la presencia de rocas intensamente fracturadas y fluidos con temperaturas del orden de 240°C a 1200 m de profundidad.

INTRODUCCIÓN

En 1983 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) inició la exploración del prospecto geotérmico Las Tres Vírgenes, donde se tiene volcanismo reciente y manifestaciones hidrotermales en la superficie (Lira *et al.*, 1983; Ballina y Herrera, 1984; Quijano, 1984). El área se localiza a los $112^\circ 30'$ de longitud W y $27^\circ 30'$ de latitud N, en la porción central de la Península de Baja California, México (Fig. 1).

La síntesis geológica más reciente, realizada por López (1998), refiere que el área se encuentra en la cuenca de Santa Rosalía. Esta es una depresión tectónica plio-cuaternaria relacionada con la apertura del Golfo de California (~ 10 Ma). Durante el Cenozoico la región estuvo sometida a un régimen tectónico extensional que originó un sistema de fallas orientado NW-SE a lo largo del cual se emplazaron dos centros eruptivos: la caldera La Reforma y la caldera El Aguajito. El volcanismo de La Reforma ocurrió hace ~ 1.6 Ma, mientras que la caldera El Aguajito tuvo actividad hace ~ 0.76 Ma, según se deduce de las edades K/Ar determinadas para algunos productos volcánicos de ambos centros eruptivos (Garduño-Monroy *et al.*, 1993). Al sistema de fallas NW-SE se superponen sistemas más jóvenes NE-SW y N-S, probablemente relacionados con el actual régimen tectónico transtensional y con el emplazamiento del

complejo volcánico Las Tres Vírgenes, formado por los volcanes El Viejo, El Azufre y La Virgen. Los dos primeros con edades K/Ar de 0.44 y 0.28 Ma, respectivamente (López *et al.* 1989, López *et al.* 1993) y el último con actividad histórica (1746).

La unidad litológica más antigua es una granodiorita (91-84 Ma) que aflora en la caldera La Reforma y que puede ser parte del batolito peninsular. En el área de estudio esta unidad se encuentra a 1000 m de profundidad y ha sido considerada como el basamento (López, 1998). Sobre el basamento se encuentra un paquete de ~ 750 m de una secuencia volcano-sedimentaria (Grupo Comondú) seguida por una secuencia de flujos de lava y productos piroclásticos de composición andesítica y espesor variable (Fm. Santa Lucía). La cuenca de Santa Rosalía está rellena con depósitos marinos de aguas someras caracterizados por una arenisca fosilífera. En la parte superior de la secuencia se encuentra una variedad de productos piroclásticos que corresponden a diferentes etapas del volcanismo Cenozoico que tuvo lugar en la región (Garduño-Monroy *et al.*, 1993; López *et al.*, 1995; López, 1998).

La información proporcionada por los trabajos de exploración sugiere que en algunas zonas la permeabilidad del basamento granodiorítico ha sido incrementada por el intenso fallamiento (Arredondo, 1995; Lira *et al.*, 1997; García y

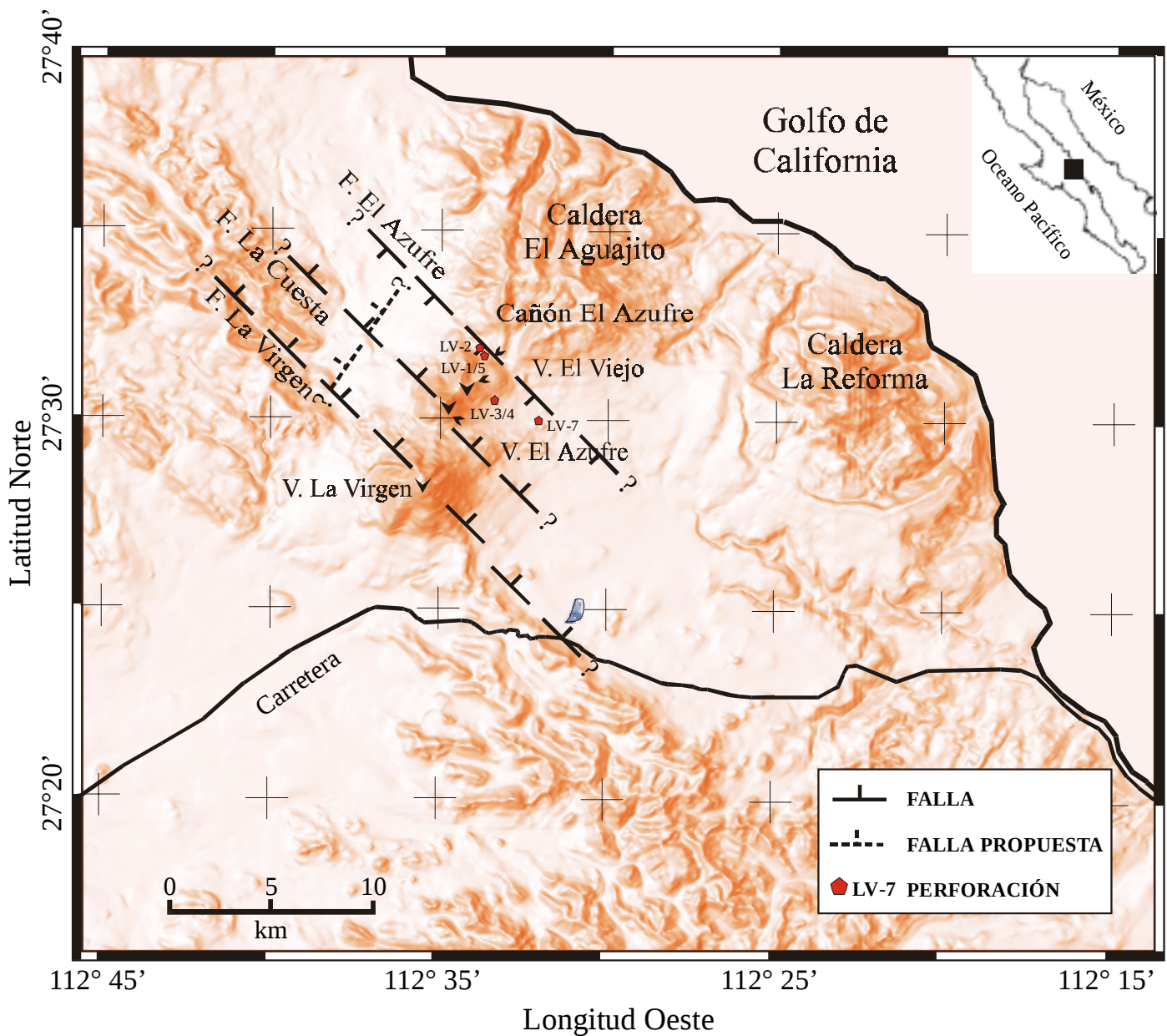


Figura 1. Localización del prospecto geotérmico Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, México. Ubicación de las estructuras y perforaciones mencionadas en el texto.

González, 1998; Bigurra, 1998; Palma, 1998). Las perforaciones exploratorias han comprobado la presencia de fluidos geotérmicos bajo condiciones de alta presión y temperatura (~120 bar y 250°C), lo que permite su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica (Sánchez-Velasco, 1996). La explotación del campo se encuentra en su etapa inicial: hasta 1998 se tenían perforados cuatro pozos productores y dos reinyectores, con el objetivo a corto plazo de instalar dos unidades generadoras de 5 MW cada una. El conocimiento actual permite proyectar a largo plazo una generación total de 25 MW (Sánchez-Velasco, 1996).

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En 1984, Ballina y Herrera llevaron a cabo una campaña de exploración geofísica mediante resistividad-c.d. (Schlumberger) para delinear anomalías de la conductividad eléctrica con posible interés geotérmico (Ballina y Herrera, 1984; Ballina, 1985). Como resultado de este trabajo se encontraron tres zonas conductoras alineadas a lo largo del cañón El Azufre y denominadas por estos autores como: Cerro Blanco, Las Víboras-La Puerta y Cueveguel. En 1992 se llevó a cabo una campaña magnetotelúrica con mediciones en 20 sitios (Vázquez *et al.*, 1992). La investigación continuó en 1994 (Romo *et al.*, 1994) con una segunda campaña que incluyó observaciones MT en 70 sitios, complementada con 55 sondeos mediante transitorios electromagnéticos (TDEM). Las observaciones realizadas

en ambas campañas se encuentran distribuidas en un área aproximada de 400 km² (Figura 2). Este conjunto de datos, junto con 44 sondeos Schlumberger de Ballina y Herrera, (1984), fue usado para investigar la distribución de la conductividad eléctrica en el subsuelo.

Los sondeos Schlumberger y TDEM se usaron para estimar la conductividad en los primeros 500 m de profundidad. Se construyeron modelos unidimensionales (1-D) formados con capas horizontales homogéneas. La mayor parte de los sondeos se pueden ajustar con modelos de dos capas: una capa resistiva (200 a 1000 Ω -m) con espesor de alrededor de 160 m, sobre otra más conductora (5 Ω -m) y más gruesa (350 m). Esta secuencia descansa sobre un basamento resistivo (> 500 Ω -m). En algunas zonas el espesor y la resistividad de la primera capa decrecen considerablemente, y corresponden a las zonas en don-

de se ha encontrado alteración hidrotermal en la superficie (Flores *et al.*, 1999).

Una vez conocida la estructura geoelectrica superficial (0 a 500 m), las curvas MT fueron corregidas por el efecto estático, comúnmente causado por distorsiones del campo electromagnético en los primeros metros de profundidad. La impedancia magnetotelúrica se estimó en una banda de frecuencia entre .005 y 50 Hz, usando los campos electromagnéticos registrados en dos sitios simultáneamente. Un análisis cualitativo de las impedancias revela que a frecuencias por debajo de 1 Hz la corriente eléctrica fluye preferentemente a lo largo de la dirección NW-SE, mientras que a frecuencias mayores no existe una dirección preferente (Romo *et al.*, 1994).

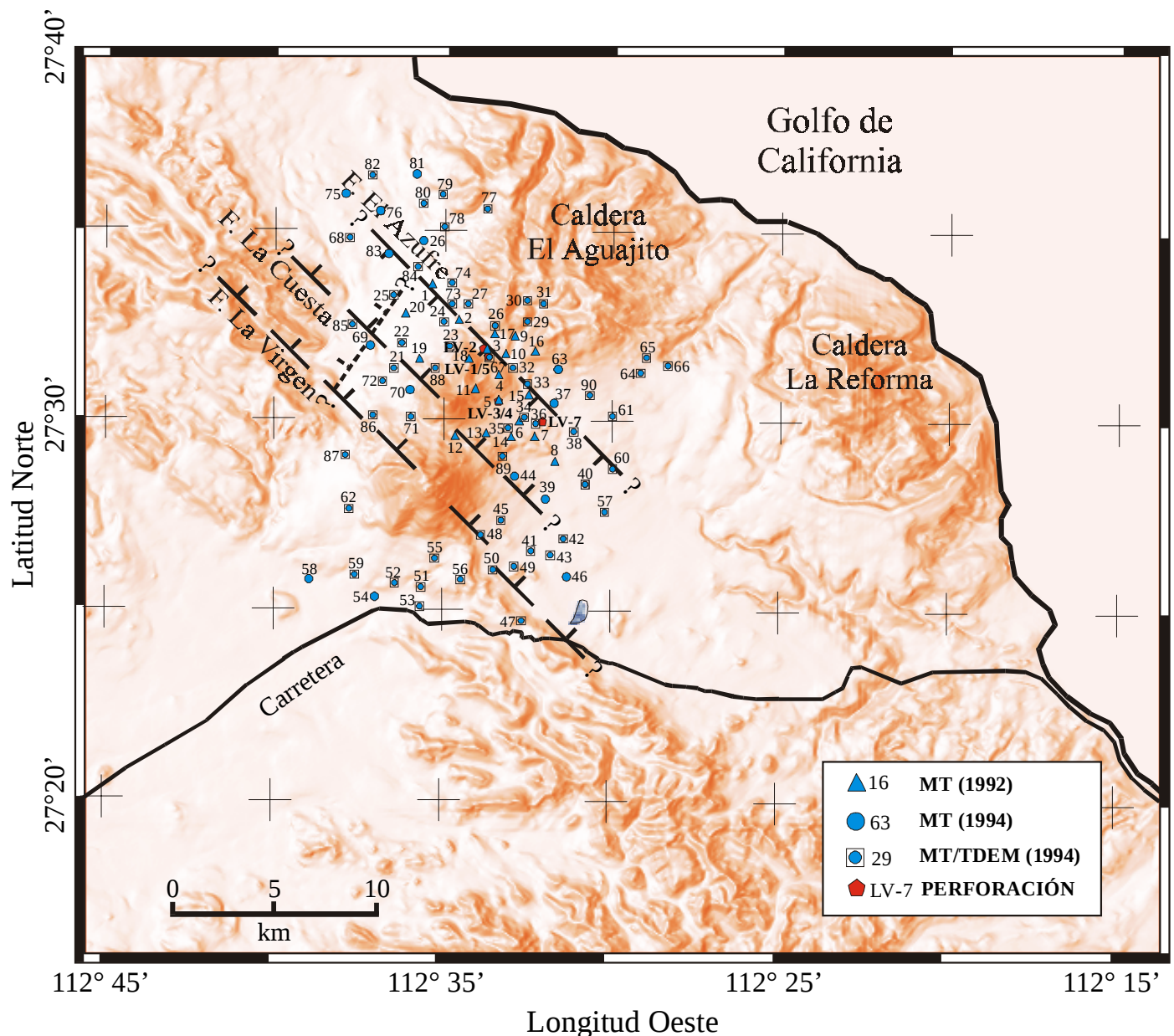


Figura 2. Conjunto de sitios magnetotelúricos y ubicación de las líneas modeladas.

Las curvas de resistividad aparente correspondientes a dos modos perpendiculares de polarización son, en general, coincidentes en la banda de frecuencias entre 1 y 50 Hz, lo que indica que la respuesta de la estructura somera corresponde a la de un medio unidimensional (1-D). Sin embargo, a frecuencias más bajas el comportamiento es distinto pues el campo eléctrico percibe variaciones laterales de la conductividad y, como consecuencia de ello, las curvas de resistividad aparente difieren entre sí. Esto indica que los modelos 1-D no son aplicables en toda la banda de frecuencias, por lo que la interpretación debe hacerse en términos de modelos bidimensionales (2-D). Romo *et al.* (1994) describen los modelos obtenidos a lo largo de nueve perfiles. En este trabajo se muestran solamente la Línea I-NE orientada NE-SW (Fig. 3) y la Línea I-NW con dirección NW-SW (Fig. 4).

En el modelo que se muestra en la Fig. 3 destaca una zona conductora ($< 5 \Omega\text{-m}$) que se detecta bajo los sitios s12, s11 y s04, con un espesor de 500 m bajo s12 que aumenta a más de 1200 m bajo s04. Si se consideran resistividades menores a $20 \Omega\text{-m}$, se puede delinear una estructura en forma de graben entre los sitios s12 y s10. El límite sudoeste de esta estructura produce el fuerte contraste lateral encontrado a mayor profundidad bajo el sitio s12 y puede corresponder a la falla La Cuesta (Fig. 1). El conductor vertical de $1 \Omega\text{-m}$ bajo s04 es el límite noreste del graben y puede asociarse con la falla El Azufre (Fig. 1). Un hecho notable es la diferente resistividad encontrada en cada

flanco del graben, lo que parece implicar que la zona de la falla El Azufre es más ancha y más permeable ($50 \Omega\text{-m}$) que la de la falla La Cuesta ($500 \Omega\text{-m}$), en donde el contraste es más brusco.

El modelo de resistividad para la Línea I-NW (Fig. 4) muestra una imagen del subsuelo un poco más simple. La zona conductora ($< 5 \Omega\text{-m}$) se extiende horizontalmente entre los sitios s85 y s45, su espesor es mayor bajo s12 y decrece hacia ambos lados de la sección. Como en el caso anterior, este cambio de espesor podría atribuirse a alguna estructura geológica, sin embargo, en este caso, esto es más difícil de postular debido a que el contraste de resistividad es más débil y a que no hay un número suficiente de observaciones a ambos lados del sitio s12. El contraste más fuerte encontrado a profundidad entre los sitios s85 y s69, proporciona una mejor evidencia para postular una falla con un escalón de ~ 1000 m a nivel del basamento. Esta estructura podría corresponder con la prolongación noroeste de la misma falla La Cuesta o a una estructura del sistema NE-SW (Fig. 1).

SISMICIDAD Y ATENUACIÓN DE ONDAS DE CODA

Entre mayo y octubre de 1992, Wong y Munguía (1992) registraron, con un equipo analógico MQ-800, más de 2000 eventos sísmicos con tiempos S-P de menos de 3 s y magnitu-

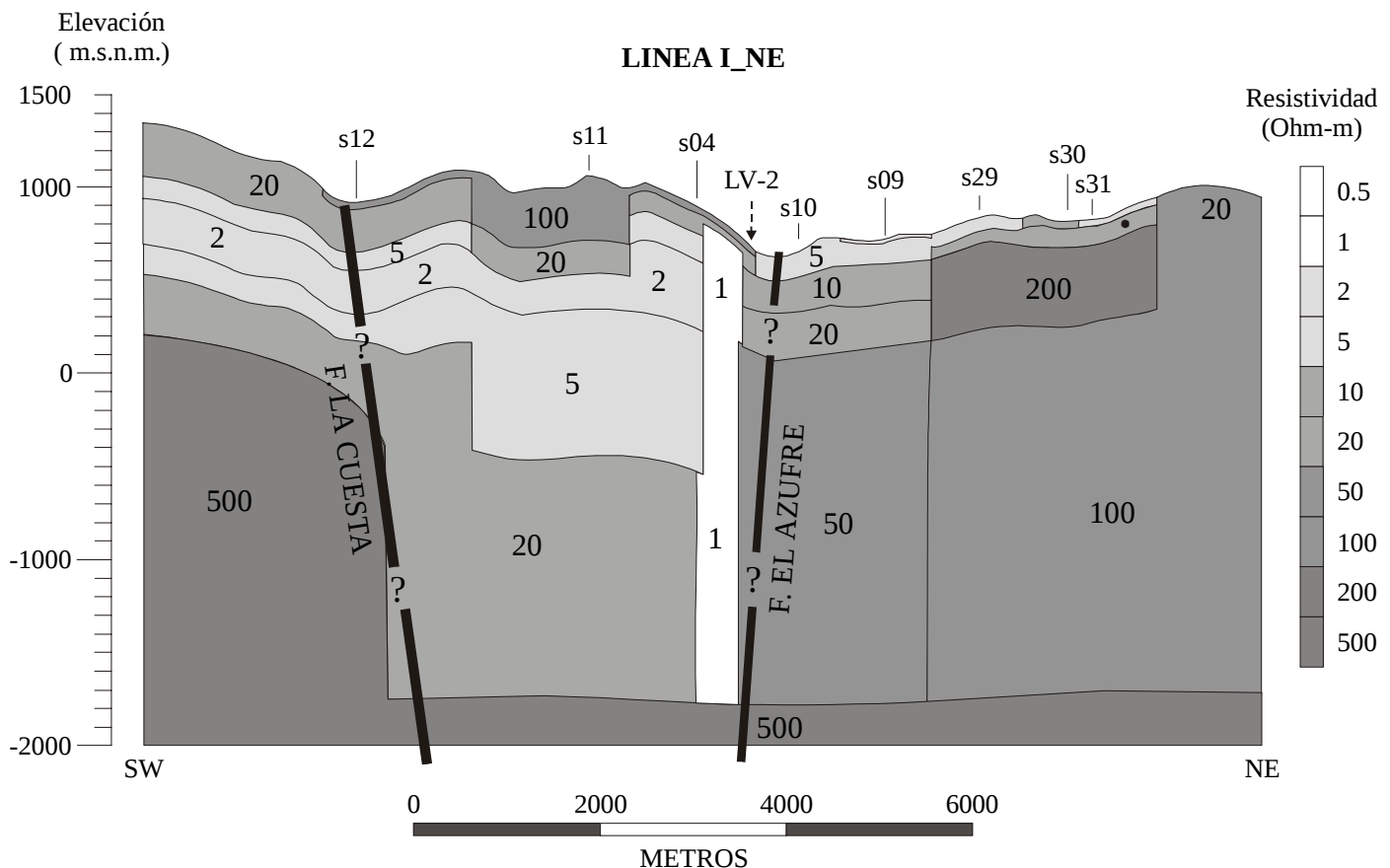


Figura 3. Modelo de resistividad para la línea I-NE.

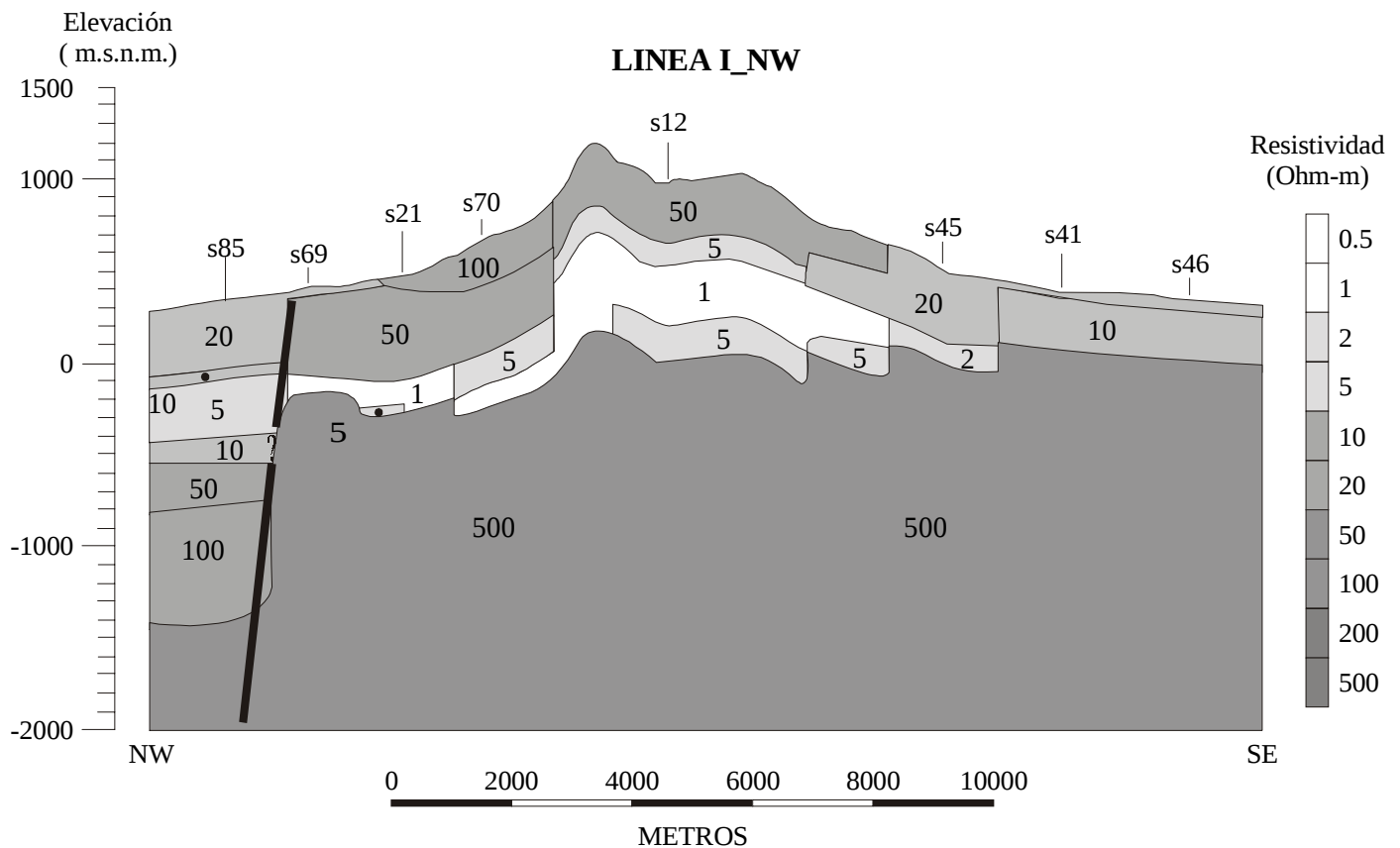


Figura 4. Modelo de resistividad para la línea I-NW.

des entre 1 y 3. Las numerosas secuencias tipo enjambre que aparecen en los registros permiten inferir que la distribución de esfuerzos es sumamente heterogénea en el área.

En 1993 la CFE instaló una red digital permanente, con objeto de utilizar la intensa actividad sísmica como herramienta de exploración. Esta red se compone de seis estaciones con registro digital de tres componentes. El análisis de cuatro meses de registro (Munguía y Wong, 1993 y 1995) demuestra que los epicentros se agrupan bajo las estructuras volcánicas y hacia el sudeste de la red. Las magnitudes estimadas varían entre 1.0 y 4.0, las mayores localizadas en el Golfo de California. Los mecanismos focales compuestos que se determinaron para un grupo de eventos, corresponden tanto a fallas normales como a fallas con desplazamiento lateral. Muchos de ellos corresponden a fallas oblicuas que combinan desplazamientos de tipo normal y de rumbo. Esta variedad de mecanismos es un reflejo de la complejidad estructural de la zona. En un análisis más reciente, Guerrero-Guadarrama (1998) estima la localización hipocentral de cerca de 650 eventos registrados por esta red entre 1993 y 1995. Como resultado de ese trabajo se desprende que la mayor parte de la actividad es de origen tectónico y se produce en los primeros 5 km de profundidad. Es posible que parte de la actividad somera se origine por el ascenso de fluidos y que ciertos enjambres se puedan atribuir al emplazamiento de diques a profundidades intermedias (3 a 4 km).

Más recientemente, Wong (2000), Wong y Munguía (1999) y Wong *et al.* (1999) analizan los datos sísmicos registrados mediante una red portátil con trece estaciones colocadas en el área por un período de 23 días, en Octubre de 1993. La red se constituyó con seis estaciones analógicas con registro de la componente vertical y siete estaciones digitales con registro de las tres componentes (Fig. 5). En las trece estaciones se dispuso de una base de tiempo absoluto. Se pudieron localizar 257 microsismos (Fig. 5), su distribución epicentral muestra que la actividad se concentra bajo la caldera El Aguajito, bajo los edificios volcánicos del campo volcánico Las Tres Vírgenes y a lo largo de la sección sudeste de la falla La Virgen. La profundidad focal varía entre 0 y 10 km; los eventos someros corresponden a la actividad bajo Las Tres Vírgenes y El Aguajito, mientras que los más profundos se localizan a lo largo del cañón El Azufre.

Los autores antes mencionados analizan la onda de coda de la componente horizontal de 26 microsismos que fueron registrados al menos en cinco estaciones de la red. Utilizan esta información para estudiar la atenuación asociada a las trayectorias seguidas por distintos grupos de rayos al viajar desde la fuente a las estaciones detectoras. Las localizaciones hipocentrales de estos eventos se reportan en Wong y Munguía (1999), sus magnitudes varían entre 1.0 y 3.0, mientras que sus profundidades se encuentran entre 3.0 y 6.0 km. El factor de calidad Q_c se estimó usando el modelo de dispersión simple de Sato (1977). En cada estación se obtuvo una estimación pro-

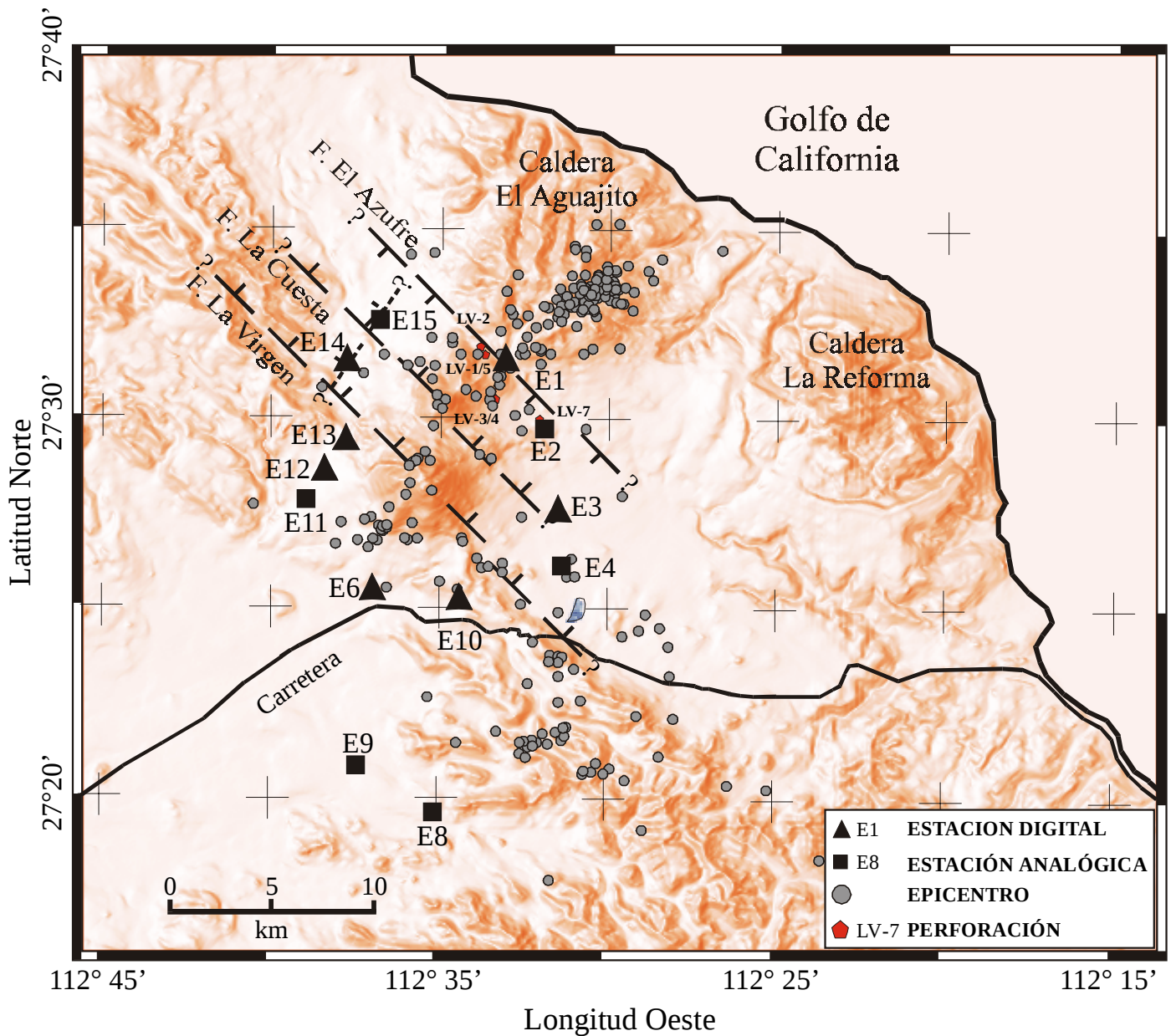


Figura 5. Red de estaciones sismológicas y localización de epicentros.

medio $\langle Q_c \rangle$ para frecuencias discretas entre 6 y 24 Hz (Fig. 6). El modelo utilizado, así como la metodología usada para la estimación se describen con todo detalle en Wong *et al.* (1999).

Los eventos se separaron en tres grupos de acuerdo a su localización epicentral. El grupo noreste corresponde a eventos localizados bajo la caldera El Aguajito, el grupo central está formado por los eventos localizados a lo largo de la cadena volcánica formada por los volcanes El Viejo, El Azufre y La Virgen, y el grupo sureste corresponde a los eventos localizados a lo largo de la sección sureste de la falla La Virgen. Usando estos tres grupos se estimó la variación del factor de calidad $\langle Q_c \rangle$ vs frecuencia, en cada una de las siete estaciones digitales (E1, E3, E6, E10, E12, E13 y E14). Los resultados se muestran en la Fig. 6 (las barras de error corresponden a una desviación estándar). Es evidente que la estación E1 tiene el mismo com-

portamiento anómalo para los tres grupos de epicentros. En esta estación el valor de $\langle Q_c \rangle$ se reduce significativamente al disminuir la frecuencia. Puede notarse que su valor a 6 Hz es 3 o 4 veces menor que el valor a la misma frecuencia en las demás estaciones. Por su parte, las funciones $\langle Q_c(f) \rangle$ para las demás estaciones son comparables entre sí, con las mayores diferencias en las frecuencias bajas. Todas ellas muestran una reducción moderada de $\langle Q_c \rangle$ al disminuir la frecuencia: un resultado comúnmente encontrado en otras áreas volcánicas (Chouet, 1976; Del Pezzo *et al.*, 1987; De Natale *et al.*, 1987; Zúñiga y Díaz, 1994).

El comportamiento anormal de E1 puede explicarse por la distorsión local producida dentro de un volumen de roca cercano al sitio de la estación detectora. Es posible que la $\langle Q_c \rangle$ estimada no represente la atenuación total, sino una medida de la

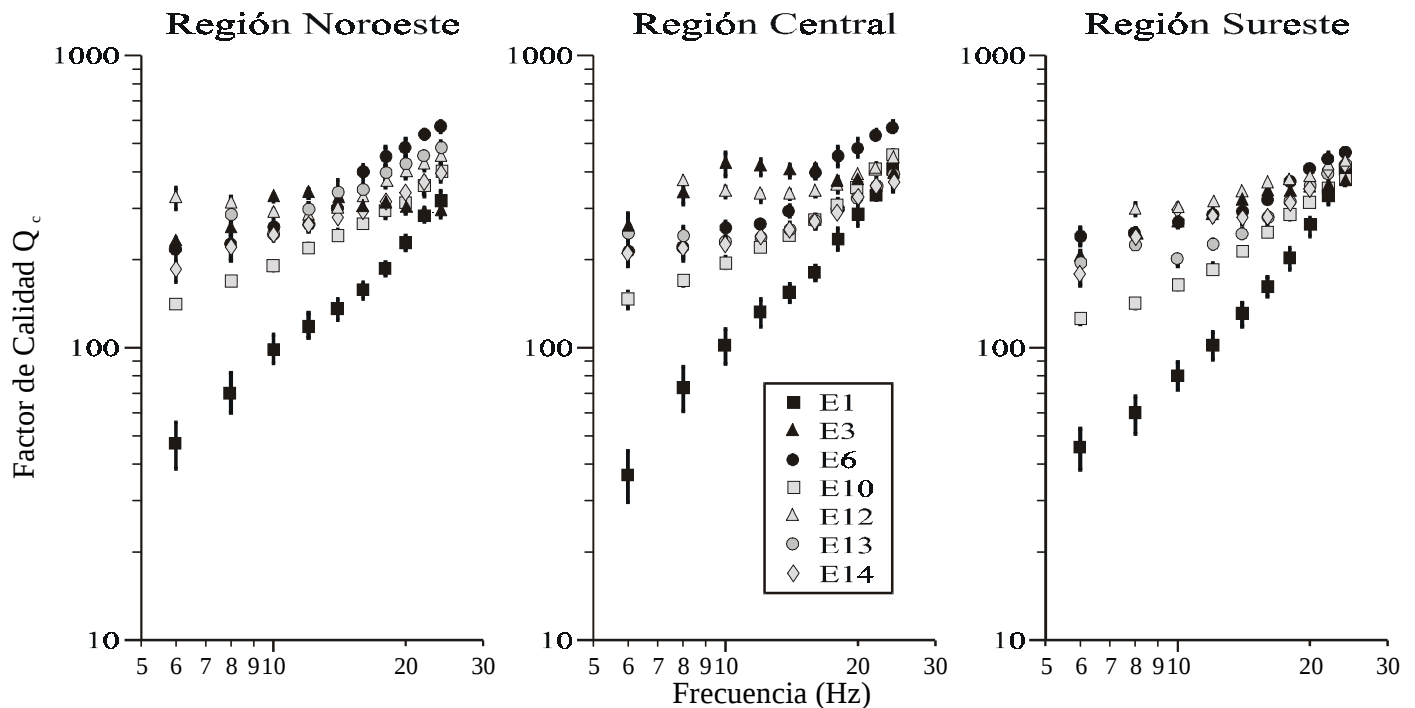


Figura 6. Variación con la frecuencia del factor de calidad Q_c estimado para tres diferentes grupos de epicentros en las siete estaciones digitales.

absorción intrínseca. Por lo tanto, como lo subraya Aki (1980) y Gao (1992), debe ser muy sensible a las condiciones físicas del volumen de roca cercano al sitio, particularmente al contenido de fluidos y al flujo entre fracturas adyacentes.

Por otro lado, cuando se comparan los resultados de los tres grupos epicentrales, se pueden observar funciones $\langle Q_c(f) \rangle$ muy similares para cada estación (incluida E1), a pesar de que cada grupo de eventos viajó por trayectorias distintas, «iluminando» distintos volúmenes del subsuelo. Este comportamiento de $\langle Q_c \rangle$ sugiere que las propiedades elásticas de estos distintos volúmenes fueron «promediadas» de tal manera que sus respuestas resultan indistinguibles.

CONCLUSIONES

Los modelos magnetotelúricos muestran una zona conductora ($< 5 \Omega\text{-m}$) a profundidades entre 250 y 750 m, probablemente relacionada a las componentes más permeables de la Formación Santa Lucía y del Grupo Comondú. En la Línea I-NE (Fig. 3) el espesor de la zona conductora bajo los sitios s12, s11 y s04 cambia de 500 m bajo s12 a más de 1200 m bajo s04.

En la Línea I-NE (Fig. 3) las resistividades menores a 20 $\Omega\text{-m}$ delinean una estructura en forma de graben entre los sitios s12 y s10. El límite sudoeste de esta estructura produce un fuerte contraste lateral encontrado a profundidad bajo s12, y puede corresponder a la falla La Cuesta. El conductor vertical de 1 $\Omega\text{-m}$ bajo s04 es el límite noreste del graben y puede asociarse con la falla El Azufre. Un hecho notable es la diferente resistividad encontrada en cada flanco del graben, lo que parece implicar

que la zona de la falla El Azufre es más ancha y más permeable (50 $\Omega\text{-m}$) que la de la falla La Cuesta (500 $\Omega\text{-m}$), en donde el contraste es más brusco.

El modelo de resistividad de la Línea I-NW (Fig. 4) muestra la zona conductora ($< 5 \Omega\text{-m}$) extendiéndose horizontalmente entre los sitios s85 y s45, su espesor es mayor bajo s12 y decrece hacia ambos lados de la sección. En este caso, es más difícil postular una estructura geológica, debido a que el contraste de resistividad es más débil y a que no hay un número suficiente de observaciones a ambos lados del sitio s12. El contraste más fuerte encontrado a profundidad entre los sitios s85 y s69, proporciona una mejor evidencia para postular una falla con un escalón de ~ 1000 m a nivel del basamento. Esta estructura podría corresponder con la prolongación noroeste de la misma falla La Cuesta o a alguna estructura del sistema NE-SW (Fig.1).

El hecho de que las funciones $\langle Q_c(f) \rangle$ de cada estación sean prácticamente independientes de las distintas trayectorias seguidas por los tres grupos epicentrales, sugiere que no son sensibles a posibles diferencias de las propiedades elásticas dentro de los grandes volúmenes del subsuelo «iluminados» por estos grupos de trayectorias. Por otro lado, los valores anómalos encontrados en la estación E1 para los tres grupos de trayectorias, sugieren que las respuestas son sensibles a diferencias en las propiedades elásticas del volumen de roca ubicado directamente bajo el sitio de detección.

Es posible que los valores de $\langle Q_c \rangle$ estimados con base en el modelo de dispersión simple no representen una medida de atenuación intrínseca. Por lo tanto, este valor debe ser muy sensible a las condiciones físicas del volumen de roca cercano al sitio (~ 2 km), particularmente al contenido de fluidos y al flujo

entre fracturas adyacentes. Por otro lado, el resultado obtenido en seis de las siete estaciones, relativo a la disminución moderada de $\langle Q \rangle$ al disminuir la frecuencia, es un resultado que se ha observado en otras áreas volcánicas donde se ha interpretado como indicativo de magma a profundidad.

La falla El Azufre, la cual posiblemente afecta al basamento, es una de las estructuras geológicas más importantes de la zona. A lo largo de esta falla existe una región del subsuelo en donde la conductividad eléctrica así como la atenuación de las ondas elásticas son anormalmente altas. En esa zona encontramos que el factor de calidad Q_c sufre una reducción significativa a medida que disminuye la frecuencia, lo que se traduce en valores de atenuación 3 o 4 veces mayores que los estimados en el resto del área. Por otra parte, en la misma zona encontramos resistividades menores a $5 \Omega\text{-m}$ a profundidades entre 250 y 2500 m. Ambos resultados concuerdan con el resultado de las perforaciones que han comprobado la presencia de rocas intensamente fracturadas y de fluidos con temperaturas mayores de 240°C a profundidades entre 1500 y 2500 m (Lira *et al.*, 1997).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se originó como resultado de dos proyectos de investigación llevados a cabo en CICESE bajo contrato con la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE. Los autores agradecen al Dr. Gerardo Hiriart, gerente de la GPG, por su autorización para publicar estos resultados. Agradecemos particularmente a todo el personal de CICESE que colaboró en los proyectos de sismología y magnetotélurico y que participó en los trabajos de campo, así como en el procesamiento e interpretación de los datos. Agradecemos también el apoyo y la cooperación del personal de CFE, especialmente al Ing. Francisco Arellano y al Ing. Saúl Venegas.

Finalmente, deseamos manifestar nuestro agradecimiento a los revisores del manuscrito, quienes con sus comentarios contribuyeron a mejorarlo significativamente y al Tec. Humberto Benítez por su ayuda en la elaboración de las figuras.

REFERENCIAS

- Aki, K. (1980). Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz. *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 21(?), pp. 50- 60.
- Arredondo, J. (1995). Reinterpretación gravimétrica a detalle en la zona de Los pozos LV-1, LV-2 y LV-3 en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., *Rep. Interno 32/95, GPG-CFE*, 18 pp.
- Ballina, H. (1985). Estudio geofísico en la zona geotérmica de Tres Vírgenes, B.C.S., *Geotermia*, Vol. 1(1), pp. 21-43.
- Ballina, H. y Herrera F. (1984). Estudio geofísico en la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S., *Rep. Interno 32/95, GPG-CFE*, 28 pp.
- Bigurra, E. (1998). Análisis geoelectrico de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S., México. *Geotermia*, Vol. 14(1), pp. 33-41.
- Chouet, B. (1976). Source, scattering and attenuation effects on high frequency seismic waves. *Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, Massachusetts.
- De Natale, G., Iannaccone, G., Martini, M., and Zollo, A. (1987). Seismic sources and attenuation properties at the Campi Flegrei volcanic area, *Pageoph*, 125, pp. 883-917.
- Del Pezzo, E., Gresta, E., Patané, G., Patané, D., and Scarcella, G. (1987). Attenuation of short period seismic waves at Etna as compared to other volcanic areas, *Pageoph*, 125, pp. 1039-1050.
- Flores, C., Vázquez, R., González, C.A., Romo, J.M., Velasco, N., y López-Tippa A., (1999). Exploración geofísica con sondeos electromagnéticos transitorios en tres zonas geotérmicas de Baja California, México: Tres Vírgenes, Puertecitos y Bahía Concepción. *Geotermia*, Vol. 15(1), pp. 25-30.
- Gao, L.S., (1992). Physical meaning of the coda envelopes, In: Volcanic Seismology, In: *Proceedings in Volcanology (I.A.V.C.E.I.)*, P. Gasparini, R. Scarpa, and K. Aki, (Eds.), Vol. 3, Springer-Verlag, New York, pp. 391- 403.
- García G., y González, M. (1998). Síntesis de los estudios de gravimetría, magnetometría y termometría en la zona geotérmica de las Tres Vírgenes, B.C.S., México, *Geotermia*, Vol. 14(1), pp. 15-32.
- Garduño-Monroy, V.H., Vargas-Ledesma, H., and Campos-Enriquez J.O., (1993). Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito (Baja California, México): a resurgent-type caldera, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 59, pp. 47-58.
- Guerrero-Guadarrama, J.L. (1998). Actividad sísmica del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B. C. SS., México. *Geotermia*, Vol. 14(2), pp. 87-100.
- Lira, H., González, M. y Arellano, J.F., (1997). Actualización del modelo conceptual del campo geotérmico de Tres Vírgenes, Baja California Sur, *Rep. Interno RE-12/97, GPG-CFE*, 26 pp.
- Lira, H., Ramirez, G., Herrera, J., y Vargas, H. (1983). Estudio geológico a semidetalle de la zona geotérmica de las Tres Vírgenes, B.C.S., *Rep. Interno 30/83, GPG-CFE*, 33 pp.
- López, A. (1998). Síntesis geológica de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S., México, *Geotermia*, Vol. 14(1), pp. 3-14.
- López, A. Casarrubias, Z., y Leal, R., (1993). Estudio geológico regional de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, *Rep. Interno OGL-BC-002/93, GPG-CFE*, 102 pp.
- López, A., García G., y Arellano J.F., (1995). Geothermal exploration at Las Tres Vírgenes, B.C.S., México, *Proceedings of the 1995 World Geoth. Congress, (I.G.A)*, Vol. 2, pp. 707- 712,
- López, A., Robin, C., Cantagrel, J.M., y Vincent, P., (1989). Estudio geoquímico, mineralógico y edades radiométricas de la zona de Tres Vírgenes, B.C.S.: implicaciones geotérmicas, *Rep. Interno 5/89, GPG-CFE*, 50 pp.

- Munguía, L., y Wong, V. (1993). Análisis e interpretación de la información sísmica digital registrada en el campo geotérmico de Tres Vírgenes, B.C.S. en el período Febrero-Mayo de 1993, *Rep. Interno, Contrato CLS-GPG-3013-93/CFE-CICESE, GPG-CFE*, 128 pp.
- Munguía, L., y Wong, V. (1995). Estudio de sismicidad en la zona geotérmica las Tres Vírgenes, Baja California Sur, In: *La sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1)*, (U.G.M.), Medina-Martínez, F., Delgado-Argote, L.A., y Suárez-Reynoso, G., (Eds.), Monografía No. 2, pp. 212-228.
- Palma, S.H. (1998). Modelado de datos magnetotelúricos en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., México, *Geotermia*, Vol. 14(1), pp. 43-53.
- Quijano, J.L. (1984). Geoquímica de gases de la zona geotérmica de Tres Vírgenes, B. C. S., *Rep. Interno 2/84, GPG-CFE*, 45 pp.
- Romo, J.M., Flores, C., Vega, R., Esparza F., y Gómez, E. (1994). Estudio magnetotelúrico en el área geotérmica Tres Vírgenes-Aguajito, B.C.S.: Informe de Interpretación, *Rep. Interno, Contrato CLS-GPG-4003-94/CFE-CICESE, GPG-CFE*, 527 pp.
- Sánchez-Velazco, R. (1996). Aspectos Generales del Proyecto Geotérmico de las Tres Vírgenes, B.C.S., México, *Geotermia*, 12, pp. 115-124.
- Sato, H. (1977). Energy propagation including scattering effects: single isotropic scattering approximation, *J. Phys. Earth*, 25, pp. 27-41.
- Vázquez, R., Vega, R., Herrera, F., y López, A. (1992). Evaluación con métodos electromagnéticos del campo geotérmico de Tres Vírgenes, B.C.S., Primera etapa, *Rep. Interno, Contrato CLS-GPG-003-94/CFE-CICESE, GPG-CFE*, 175 pp.
- Wong, V., (2000), Estudio de sismotectónica, atenuación y tomografía sísmica en la región volcánica y geotérmica Las Tres Vírgenes, B.C.S., México, *Tesis doctoral, CICESE*. (en preparación)
- Wong, V., Munguía, L. y Rebollar, C.J. (1999). Attenuation of coda waves at Las Tres Vírgenes volcanic area, Baja California Sur, México. (sometido).
- Wong, V., y Munguía, L. (1992). Monitoreo sísmico del área geotérmica de Tres Vírgenes, Baja California Sur, *Rep. Interno, Contrato CLS-CPG-3011-92/CFE-CICESE, GPG-CFE*, 16 pp.
- Wong, V., y Munguía, L. (1999). Seismic studies and focal mechanisms determination at Las Tres Vírgenes volcanic area, B.C.S., México. (en preparación).
- Zúñiga, F.R., y Díaz, L.E. (1994). Coda attenuation in the area of El Chichón volcano, Chiapas, México, *Tectonophysics*, 234, pp. 247-258.