



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**CARACTERIZACIÓN SISMOLÓGICA,  
AEROMAGNÉTICA Y MAGNETOTELÚRICA DEL  
CAMPO VOLCÁNICO Y GEOTÉRMICO DE LAS  
TRES VÍRGENES (B.C.S.), MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**(Exploración Geofísica)**

Presenta:

**Yanet Teresa Antayhua Vera**

Tutor:

Dr. José Oscar Campos Enríquez..Instituto.de.Geofísica

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Marzo, 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO DE EXAMEN DE GRADO:

Dr. José Luis Macías Vázquez	Presidente
Dr. Marco Calò	Vocal
Dr. José Oscar Campos Enríquez	Secretario
Dr. Martyn Unsworth	Suplente
Dra. Joann M. Stock	Suplente

## **AGRADECIMIENTOS**

*MI PROFUNDO AGRADECIMIENTO a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por permitirme ser parte de esta prestigiosa casa de estudios. Al Posgrado en Ciencias de la Tierra, al Instituto de Geofísica y al Instituto de Ingeniería.*

*ESPECIAL AGRADECIMIENTO a CONACyT por la beca recibida. Al proyecto PAPIIT (IN110813). A la Comisión Federal de Electricidad (CFE), por permitirme el uso de los datos e información bibliográfica previa; con ellos fue posible llevar a buen término este trabajo de investigación doctoral.*

*A la Universidad de Alberta (Canadá) y la Universidad Nacional de Colombia (Colombia), por recibirme en sus instalaciones durante mis visitas de trabajo.*

*Existen personas especiales para quienes las palabras no son suficientes para expresar mi agradecimiento pues compartieron conmigo sus conocimientos y experiencias para llevar a buen término este trabajo de investigación doctoral; por ello, desde lo más profundo de mi corazón quiero decirles MUCHAS GRACIAS INFINITAS a mi tutor principal Dr. Oscar Campos Enríquez; a mi tutor externo M. en C. Javier Lermo Samaniego; a los integrantes de mi Comité Tutor y Jurado de Examen de Grado: Dra Claudia Arango, Dr. Martyn Unsworth, Dr. José Luis Macías, Dra. Joann Stock y al Dr. Marco Calò.*

*MILLONES DE GRACIAS a los doctores: Luis Quintanar (Instituto de Geofísica), Carlos Vargas (Universidad Nacional de Colombia), Joann Stock (Instituto Tecnológico de California), José Romo Jones y Victor Wong (CICESE), José Luis Macías (Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán), Carlos Valdés (CENAPRED), Jaime Yamamoto (Instituto de Geofísica) y Ramón Zúñiga (Centro de GEOCIENCIAS). A la Ing. Cecilia Lorenzo de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de CFE. Su apoyo incondicional, comentarios y sugerencias permitieron mejorar la calidad de mi tesis.*

*Extiendo mi AGRADECIMIENTO INFINITO al Dr. Gustavo Tolson y Dra. Elizabeth Solleiro, coordinadores del Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, así como a Araceli Chamán y Laura Mendoza, por todo el apoyo administrativo recibido. Al Dr. Jorge Aguirre, al M. en C. Miguel Rodríguez, a Julio Cuenca y Tere Becerril, de la Coordinación de Ingeniería Sismológica.*

*Por sus enseñanzas y soporte técnico en la aplicación del método magnetoteléurico quiero decir MUCHAS GRACIAS a los estudiantes y colaboradores de los doctores Martyn Unsworth y Claudia Arango, ellos son: Darcy Cordell, Matthew Comeau, Enci Wang, Benjamin Lee, Alejandro Vázquez y José Luis Salas.*

*A INGEMMET (Perú) y la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), WestJEC (Japón) y Phoenix Geophysics (Canadá) por hacerme partícipe de los estudios de volcanes y de exploración geotérmica. Gracias a ellos pude conocer las bondades del método magnetoteléurico.*

*A Elenita Claudio y su familia, quienes me brindaron su amistad y su casa durante mi etapa de estudiante de Maestría y Doctorado. A los compañeros y amigos becarios del Instituto de Ingeniería: Nallely, Joel, Erick, Rogelio, Navil y Roberto.*

*En Perú, a los doctores José Macharé, Victor Carlotto, Hernando Tavera e ingenieros Lionel Fidel y Bilberto Zavala. Ustedes son mi ejemplo de vida profesional, MUCHAS GRACIAS POR TODO.*

*A mi querida y numerosa familia. Mis padres Julieta Vera y Marcial Antayhua; mis hermanos Félix, María, Isabel, Marcial, Augusto, Guido, Rosario y mi tío Luis Vera, ustedes siempre serán MI MOTIVACIÓN.*

*Finalmente, a mis amigas Julia Carpio y su familia, Luzmarina Villanueva, Vicentina Cruz, Rocío Parrillo y Yolanda Zamudio, muchas gracias por sus energías positivas y sus buenos deseos para conmigo.*

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	3
RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	9
CAPÍTULO 1.....	10
INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 ESTUDIOS PREVIOS.....	11
1.1.1 Estudios geológicos.....	11
1.1.2 Estudios geofísicos .....	12
1.1.3 Estudios geoquímicos.....	15
1.1.4 Modelos geotérmicos conceptuales.....	15
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	20
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	21
CAPÍTULO 2.....	22
ASPECTO TECTÓNICO, FISIOGRÁFICO Y GEOLÓGICO .....	22
2.1 TECTÓNICA REGIONAL.....	22
2.2 FISIOGRAFÍA Y GEOLOGÍA REGIONAL .....	25
2.3 GEOLOGÍA Y TECTÓNICA LOCAL.....	25
2.4 POZO INYECTOR LV8 Y PRODUCTOR LV6.....	33
CAPÍTULO 3.....	35
ESTUDIO SISMOLÓGICO.....	35
3.1 ANTECEDENTES .....	35
3.2 SISMICIDAD DEL CVGTV .....	39
3.2.1 Datos sísmicos.....	39
3.2.2 Localización hipocentral .....	40
3.2.3 Distribución de la sismicidad.....	44
3.2.4 Distribución de la sismicidad por años.....	48
3.3 SISMICIDAD Y PROCESOS DE INYECCIÓN .....	55
3.4 MECANISMOS FOCALES Y TENSOR DE ESFUERZO.....	58
3.4.1 Mecanismos focales.....	58
3.4.2 Inversión del tensor de esfuerzo .....	61
3.4.3 Resultados de la inversión y correlación con la tectónica regional y local .....	61
3.5 ATENUACIÓN DE ONDAS DE CODA ( $Q_c^{-1}$ ) .....	68
3.5.1 Estimación Coda $Q_c$ y leyes de atenuación del CVGTV .....	69
3.5.2 Leyes de atenuación por zonas sísmicas .....	72
3.5.3 Leyes de atenuación por estaciones sísmicas .....	73
3.5.4 Regionalización de coda $Q_c$ .....	74
3.6 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUENTE .....	78
3.6.1 Parámetros de fuente en el CVGTV.....	79
3.6.2 Análisis de los parámetros de fuente.....	82

3.6.3	Parámetros de fuente por zonas sísmicas .....	83
3.6.4	Parámetros de fuente de los enjambres sísmicos .....	84
3.7	TOMOGRAFÍA DEL VALOR <i>b</i> .....	87
3.7.1	<i>Valor b</i> en el CVGTV .....	89
3.7.2	<i>Valor b</i> por zonas sísmicas .....	92
3.7.3	<i>Valor b</i> por profundidad .....	94
3.7.4	Tomografía pseudo 3D del <i>valor b</i> y correlación con la tectónica del CVGTV .....	96
3.7.5	Correlación temporal del <i>valor b</i> y la inyección .....	100
3.8	RESUMEN GENERAL DEL ESTUDIO SISMOLÓGICO .....	101
CAPÍTULO 4 .....		105
ESTUDIO AEROMAGNÉTICO REGIONAL Y LOCAL .....		105
4.1	INTRODUCCIÓN .....	105
4.2	DATOS Y PROCESAMIENTO .....	107
4.3	MAPA AEROMAGNÉTICO DE ANOMALIAS DE CAMPO TOTAL .....	107
4.3.1	Dominios magnéticos regionales .....	107
4.3.2	Mapas de derivadas .....	110
4.3.3	Mapas de gradientes .....	113
4.4	PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO MAGNÉTICO Y A LA TEMPERATURA DE CURIE .....	116
4.5	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO AEROMAGNÉTICO .....	120
CAPÍTULO 5 .....		122
ESTUDIO MAGNETOTELÚRICO .....		122
5.1	INTRODUCCIÓN .....	122
5.1.1	El Método Magnetotelúrico (MT) .....	124
5.2	LOS DATOS MAGNETOTELÚRICOS DEL CVGTV .....	126
5.3	PROCESAMIENTO DE DATOS MT .....	126
5.3.1	Tipos de curvas de resistividad aparente .....	126
5.3.2	Análisis de la dimensionalidad y direccionalidad .....	129
5.4	INVERSIÓN TRIDIMENSIONAL (3D) DE LOS SONDEOS MT .....	135
5.4.1	Algoritmo de inversión 3D .....	135
5.5	ESTRUCTURA RESISTIVA DEL CVGTV .....	138
5.5.1	Mapas de distribución de la resistividad: Modelos I y II .....	138
5.5.2	Distribución de la resistividad en profundidad: Modelos I y II .....	143
5.5.3	Similitudes y diferencias de la distribución de la resistividad en profundidad obtenidas con la inversión 3D (Modelos I, II) y la inversión 2D de Romo et al. (2005) ..	152
5.5.4	Pruebas de la resolución del modelo de inversión 3D .....	153
5.5.5	Correlación de los estudios sismológicos, geológico-estratigráficos y la temperatura con la distribución de la resistividad del CVGTV: Modelos I y II .....	155
5.6	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO MAGNETOTELÚRICO .....	163
CAPÍTULO 6 .....		164
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CARACTERIZACIÓN SÍSMICA, AEROMAGNÉTICA Y MAGNETOTELÚRICA DEL CVGTV .....		164
6.1	INTRODUCCIÓN .....	164

6.2 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	165
6.3 CARACTERIZACIÓN SÍSMICA, AEROMAGNÉTICA Y MAGNETOTELÚRICA DEL CAMPO VOLCÁNICO Y GEOTÉRMICO DE LAS TRES VÍRGENES (CVGTV).....	167
CAPÍTULO 7.....	173
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	173
7.1 CONCLUSIONES.....	173
7.1.1 Del estudio sismológico (periodo 2003-2013).....	173
7.1.2 Del estudio aeromagnético .....	174
7.1.3 Del estudio magnetotelúrico .....	175
7.1.4 De la caracterización geofísica del CVGTV.....	175
7.2 RECOMENDACIONES .....	176
BIBLIOGRAFÍA .....	178
LISTA DE FIGURAS .....	196
LISTA DE TABLAS.....	206
ANEXOS.....	208

## RESUMEN

En este estudio, se analizaron los datos sismológicos, aeromagnéticos y magnetotelúricos del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV). Los resultados de este estudio y trabajos previos permitieron caracterizar el CVGTV. Esta caracterización sigue el modelo clásico de resistividad compuesto por 5 zonas: 2 zonas resistivas y 3 zonas conductivas. De estas 5 zonas, resalta la zona lateral conductiva C1, ubicada entre 2 zonas de alta resistividad (R1 y R2). Esta zona conductiva C1, está correlacionada con las rocas sedimentarias y volcánicas, con alto grado de fracturamiento, alteración hidrotermal y ausencia de sismicidad. Por debajo de la zona anómala C1, resalta la zona de alta resistividad R2, que se constituye como el reservorio geotérmico del CVGTV. En esta zona resistiva, las operaciones de explotación (en especial la inyección), así como los procesos tectónicos propios de la zona, explicarían el origen de la intensa actividad sísmica, que ocurren hasta a profundidades menores a 6.5 km, en la parte central del campo geotérmico (Zona A) y menores a 8 y 11 km en las zonas periféricas (Zonas B, C, D). Esta profundidad máxima, delimitaría la zona de transición reológica frágil-dúctil (ZT) del campo geotérmico; representaría, también, los límites del basamento, el límite de la zona resistiva R2 y la posible delineación de la isoterma de  $\sim 350^{\circ}\text{C}$ . Por la forma, de un anticlinal, que ZT adquiere en la zona central del CVGTV y por debajo del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) así como la forma de la anomalía conductiva C3(?) y la ausencia de sismicidad, sugerirían la posible intrusión de un cuerpo parcialmente fundido (i.e., dique caliente) de  $\sim 4$  km de extensión. Esta intrusión, a su vez, actuaría como la fuente de calor del CVGTV, los fluidos geotérmicos serían transportados a través de los diferentes sistemas de fallas regionales y locales hasta el reservorio geotérmico y la superficie del CVGTV, tal como sugerirían los resultados del modelo bidimensional de los cuerpos magnéticos. Finalmente, los resultados de los estudios sismológicos, aeromagnéticos y magnetotelúricos muestran que la tectónica controlaría el vulcanismo y la geotermia en el CVGTV.

**Palabras claves:** Tres Vírgenes, sismicidad, aeromagnética, magnetotelúrica, volcanes, geotermia.

## ABSTRACT

In this study, we analyzed the seismological, aeromagnetic and magnetotelluric data at Las Tres Virgenes Volcanic and Geothermal Field (TVVGF). The results of this study and previous works allowed us to characterize the TVVGF. Accordingly, the TVVGF follows the classical resistivity model composed of five zones: two resistive zones and three conductive zones. Among these zones, stands out the lateral conductive zone C1 located between the R1 and R2 resistive zones. This conductive zone correlates with the sedimentary and volcanic rocks, high fault and fracture density, hydrothermal alteration and absence of seismicity. Below the conductive zone C1, stands out the R2 high resistivity zone, which comprises the TVVGF geothermal reservoir. In this resistive zone the exploitation activities (especially injection processes), as well as the typical tectonic processes of the zone account for the origin of the seismic activity, occurring at depths less than 6.5 km in the central zone of the geothermal field (Zone A) and less than 8 and 11 km in the peripheral zones (Zones B, C, D). This maximum depth delineates the fragile-ductile rheological transition zone (ZT) of the geothermal field; it would also represent the boundaries of the basement, the limit of the resistive zone R2 and the possible delineation of the  $\sim 350$  °C isotherm. Because of anticline shape, which ZT acquires in the central zone of the TVVGF and below of the Las Tres Virgenes Volcanic Complex (TVVC), as well as the shape of the conductive anomaly C3(?) and the absence of seismicity would suggest a possible intrusion of a partially molten body or a hot dike of  $\sim 4$  km in length. Besides this intrusion would act as the heat source at TVVGF, which would be transported advectively to the geothermal reservoir and at TVVGF surface through of regional and local fault systems, as, would suggest the results of the two-dimensional model of magnetic bodies. Finally, the results of the seismological, aeromagnetic and magnetotelluric studies show that tectonics would control the volcanism and geothermal at TVVGF.

**Keywords:** Tres Virgenes, Seismicity, Aeromagnetic, Magnetotelluric, Volcanoes, Geothermal.

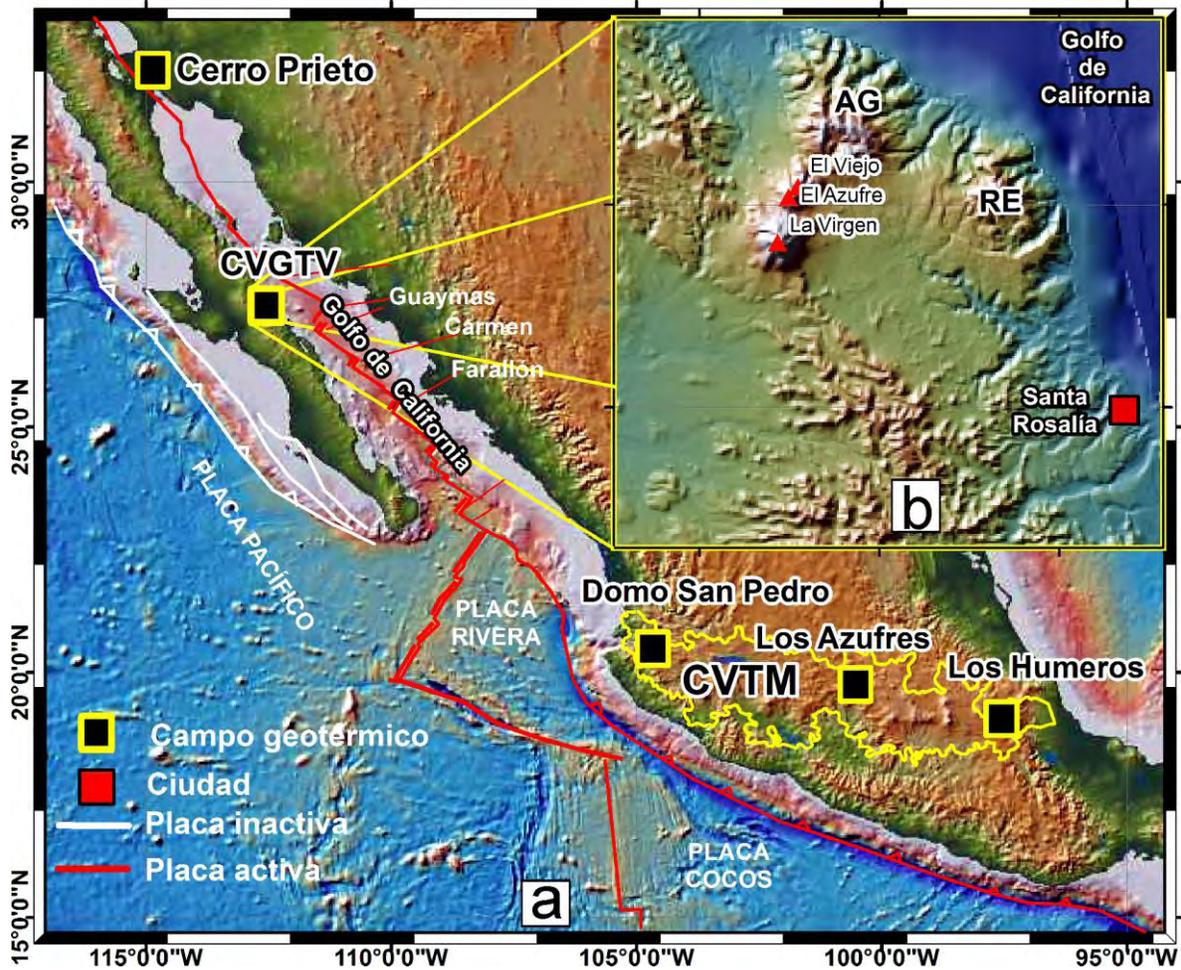
## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

México, ha experimentado un relativo crecimiento en la generación de energía eléctrica a partir de la explotación del recurso geotérmico. A nivel mundial ocupa el cuarto lugar en aprovechamiento de este recurso geotérmico, y a la fecha cuenta con 1055.2 megawatts (MW) de capacidad instalada y de 877 MW de capacidad de operación efectiva, lo que representa el 1.5% de la capacidad eléctrica total del país. Esta energía proviene de 5 campos geotérmicos (Figura 1.1a), 4 de ellos operados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE): 1) Cerro Prieto, Baja California (570 MW), 2) Los Azufres, Michoacán (218.4 MW), 3) Los Humeros, Puebla (68.6 MW), 4) Las Tres Vírgenes, Baja California Sur (10 MW) y 5) el campo geotérmico Domo San Pedro, Nayarit (10 MW), operado por la empresa privada Grupo Dragón (AGM, 2016; <http://www.geotermia.org.mx/geotermia>). De estos 5 campos geotérmicos, el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) (Figura 1.1b), representa el tema de estudio de esta tesis.

El CVGTV se localiza en la Península de Baja California, en la porción norte del estado de Baja California Sur (Figura 1.1a) y a 34 km al noroeste de la ciudad de Santa Rosalía (Figura 1.1b). Su nombre proviene de la alineación, en dirección NE-SO, del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) compuesto de tres volcanes: El Viejo (198±42 ka.), El Azufre (>44 ka.) y La Virgen (~36 ka) (López et al., 1994; Capra et al., 1998). Este complejo volcánico es el más joven comparado con las estructuras volcánicas de La Reforma (RE) (~1.2 Ma) (Sawlan, 1986) y El Aguajito (AG) (~0.8 Ma) (Garduño-Monroy et al., 1993) (Figura 1.1b).

Desde 1982, se llevaron a cabo diversos estudios geológicos y tectónicos (López et al., 1993; López, 1998; Capra et al., 1998; Gómez y Rocha, 2009; Benton et al., 2011; Macías et al., 2011; Macías y Jiménez, 2012, 2013), geofísicos (Ballina y Herrera, 1985; Campos-Enríquez, 1992; Macías, 1997; Bigurra-Pimentel, 1998; García-Estrada y González-López., 1998; Palma-Guzmán, 1998; Wong, 2000; Romo-Jones et al., 2000; Romo et al., 2005; Wong y Munguía, 2006; Gómez et al., 2010; Lermo et al., 2011; Soto et al. (2010); Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo, 2013; Soto-Peredo, 2014), geoquímicos (Lira et al., 1997; Portugal et al., 2000; Verma et al., 2006; Estrada y Sandoval, 2011), inicialmente, para conocer la factibilidad de la extracción del recurso geotermal con fines comerciales y, posteriormente para la ampliación de la explotación del mismo. El resumen de algunos de estos estudios, son presentados a continuación.



**Figura 1.1.** a) Ubicación geográfica de los campos geotérmicos de México y tectónica regional del Golfo de California. b) Ampliación del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y ubicación de la ciudad de Santa Rosalía. El polígono en amarillo representa al Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM); los triángulos en rojo, los volcanes del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV). AG= Caldera El Aguajito; RE= Caldera La Reforma.

## 1.1 ESTUDIOS PREVIOS

### 1.1.1 Estudios geológicos

*Capra et al. (1998)*, estudiaron detalladamente dos secuencias piroclásticas expuestas en el extremo sur del CVTV, denominándolos Mezquital y La Virgen e interpretándolos como productos de una erupción vulcaniana y pliniana, está última fechada en 6500 años antes del presente.

*López (1998)*, realizó la síntesis geológica de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes. Describió con detalle la evolución de los complejos volcánicos, la aparición progresiva de los

diferentes sistemas de fallas y la ubicación del sistema hidrotermal dentro de un cuerpo granodiorítico y que se encontraría por debajo del volcán El Azufre.

**Gómez y Rocha (2009)**, realizaron el estudio estructural detallado del CVGTV. Identificaron y mapearon 4 sistemas de fallas principales (NE-SO, N-S, NO-SE y E-O). Asimismo, revelaron la complejidad tectónica del campo geotérmico debido a la presencia de numerosas fallas menores entre los sistemas principales. Estas fallas menores, con direcciones opuestas en buzamiento, son conjugadas.

**Schmitt et al. (2006, 2010)**, estudiaron, también, la edad de los fragmentos piroclásticos de la erupción pliniana ([Capra et al., 1998](#)), utilizaron para ello, una combinación de métodos, la edad estimada de ~36000 años difiere ampliamente de la estimada por [Capra et al. \(1998\)](#).

**Macías y Jiménez (2012, 2013)**, actualizaron la información geológica-vulcanológica del complejo de Las Tres Vírgenes. Identificaron nuevas fallas como Bonfil. Analizaron químicamente los tipos de rocas e identificaron los procesos eruptivos del complejo volcánico. Asimismo, establecieron que los magmas que las originaron fueron generados a profundidades entre 7 y 9 km.

### 1.1.2 Estudios geofísicos

**Ballina y Herrera (1984)**, realizaron el estudio magnetométrico de campo total. Los resultados sugieren que las anomalías magnéticas identificadas tienen una fuente somera de algunos cientos de metros, también evidenciaron alineamientos de cuerpos magnéticos que no tienen manifestación en superficie, pues se tratarían de intrusiones cubiertas.

**Bigurra-Pimentel (1998)**, realizó estudios de resistividad eléctrica (SEV). Los resultados permitieron definir 3 ambientes geoelectrónicos en el área de Las Tres Vírgenes. La más superficial asociada a los materiales volcánicos con 2200 y 200  $\Omega\text{m}$ ; el segundo ambiente estaría asociado al acuífero del área, las formaciones Santa Lucía, Comondú y parte superior del granito, los valores de resistividad oscilan entre 1500 y 250  $\Omega\text{m}$ ; el tercer ambiente, asociado a la zona hidrotermal bajo los volcanes El Azufre y El Partido, con valores bajos de resistividad entre 100 y 30  $\Omega\text{m}$ .

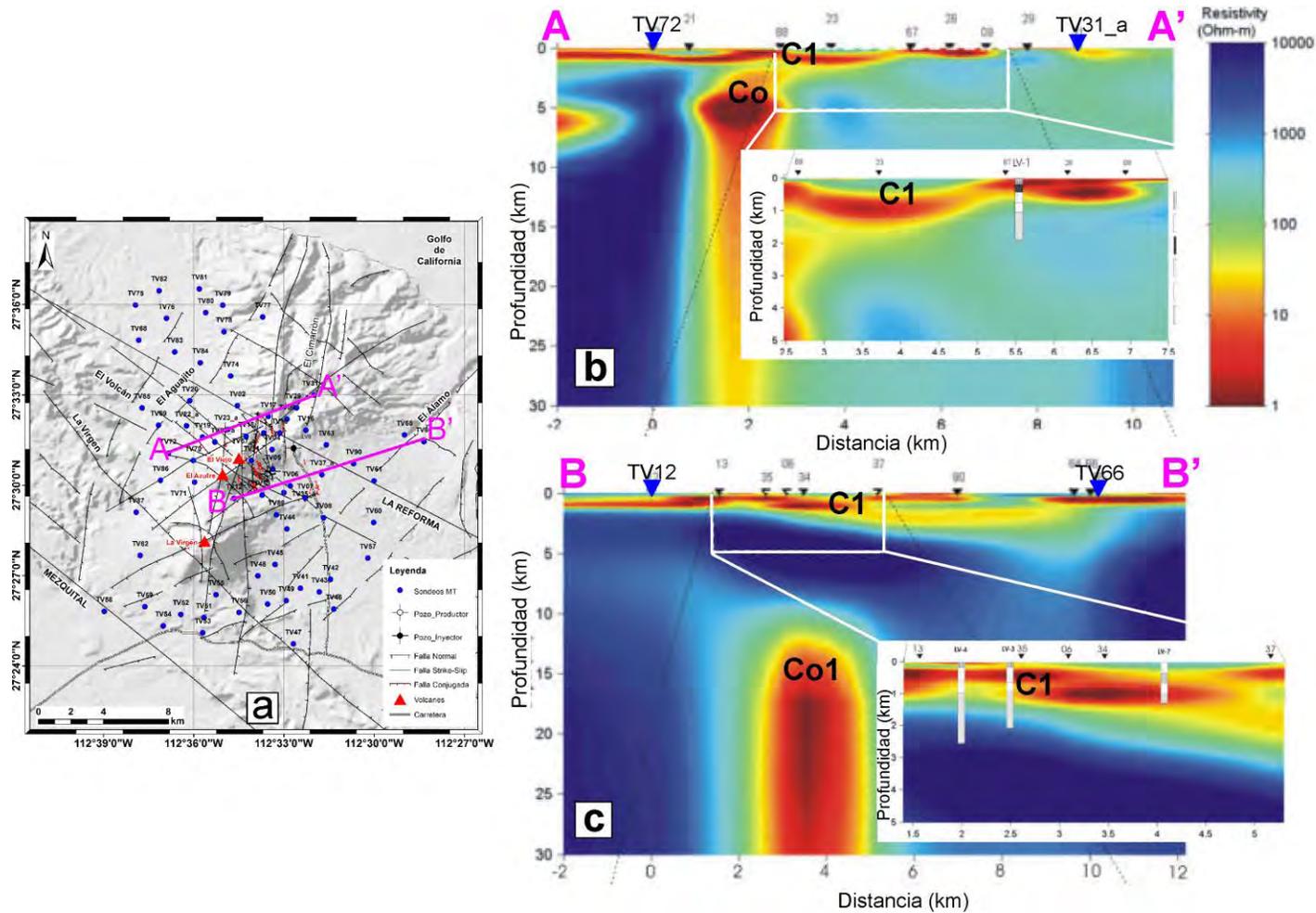
**Palma-Guzmán (1998)**, recopiló los estudios magnetotéluricos realizados por [Vázquez et al. \(1992\)](#) y [Romo et al. \(1994\)](#) y reinterpretó los resultados. El autor sugiere que las variaciones laterales de la resistividad están relacionadas con los cambios estructurales y la litología obtenida de los pozos perforados. Además, permitió determinar los límites probables del yacimiento geotérmico, así como las estructuras geológicas asociadas a la producción.

**Romo et al. (2000)**, analizaron la conductividad eléctrica y la atenuación de las ondas de coda en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes. Los resultados obtenidos por los autores sugieren que a lo largo del Cañon El Azufre la conductividad eléctrica y la atenuación de las ondas sísmicas son anormalmente altas y estaría asociados al alto fracturamiento y la presencia de fluidos de alta temperatura.

**Romo et al. (2005)**, realizaron el estudio magnetotelúrico del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes aplicando el método de funciones de respuesta Serie-Palalelo (Romo et al., 2004). Los resultados de esta inversión 2D y presentados en 2 perfiles A-A' (Figura 1.2a) y B-B' (Figura 1.2b) sugieren la presencia de anomalías conductivas superficiales (C1) estrechamente correlacionadas con las rocas que conforman las formaciones Santa Lucía y Comodú y las anomalías profundas (Co, Co1) a posibles fuentes de calor y/o fluidos salinos. Tal como sugieren los autores, las anomalías conductivas Co (Figura 1.2a) y Co1 (Figura 1.2b) estarían ubicadas entre 5 km (Co) y 12 km (Co1) y no tendrían conexión entre ellas. También mencionan que las formas elongadas de estas anomalías a mayor profundidad podrían deberse a "artefactos" generados por la metodología utilizada.

**Wong y Munguía, (2006)**, analizaron la sismicidad registrada en octubre de 1993. Los resultados mostraron una intensa actividad sísmica a profundidades menores a 8 km y magnitudes entre 1 y 3 grados. El estado de esfuerzo regional, obtenido a partir de los mecanismos focales de los sismos, sugieren que éste campo geotérmico está sometido a esfuerzos compresivos y extensivos en direcciones N-S y E-O respectivamente. Estos esfuerzos están en concordancia con el regimen de esfuerzo de las fallas transformante del Golfo de California. Asimismo, la estimación de la relación de velocidad Vp/Vs y la atenuación sísmica, evidenciaron la heterogeneidad de los materiales de la que está compuesto el subsuelo del campo geotérmico, especialmente, debajo del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) y hacia la falla el Azufre y caldera El Aguajito.

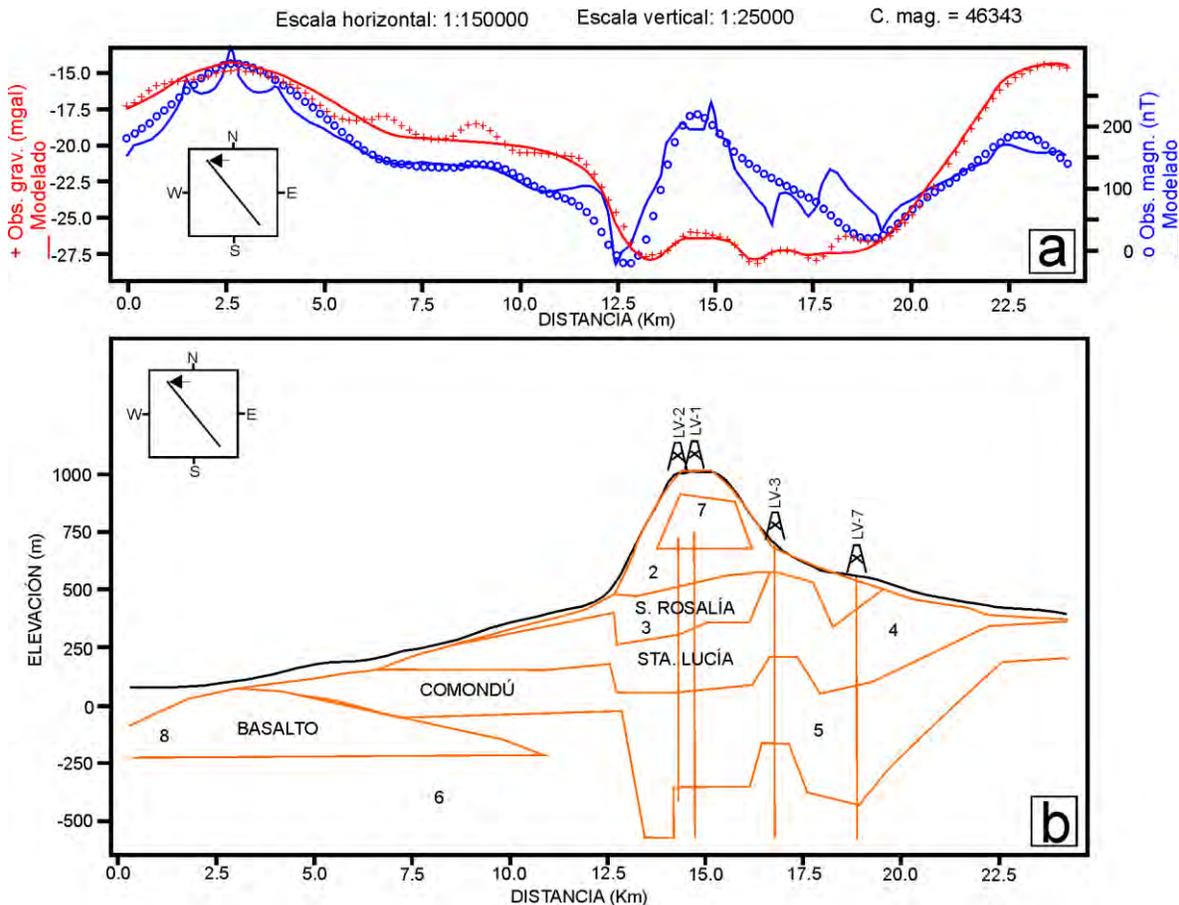
**Soto et al. (2010)**, analizó el sismo registrado el 13 de agosto de 2010, con magnitud 3.5 Mc, ocurrido en Las Tres Vírgenes. Los autores reportaron que, después del sismo principal de 3.5 Mc, se generó una secuencia de sismos (enjambres). El analisis del mecanismo focal, asocia un fallamiento de tipo normal, buzando al NE



**Figura 1.2.** a) Ubicación de los perfiles de resistividad A-A' y B-B' con dirección SO-NE, elaborados por Romo et al. (2005). b y c) Resultados de la distribución de la resistividad en profundidad, obtenidos a partir de la inversión 2D. Los rectángulos centrales en color blanco muestran la ampliación de las zonas conductoras superficiales asociadas con la estratigrafía del CVGTV.



*García y González (1998)*, realizaron la síntesis de los estudios de gravimetría, magnetometría y termometría en la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes. Los resultados fueron resumidos en dos perfiles bidimensionales en dirección NO-SE, uno magnético (reducido al polo) y otro gravimétrico (Figura 1.4). La interpretación de ambos perfiles, sugieren que la presencia de bajos gravimétricos, así como los altos magnéticos y viceversa, están correlacionados con *horts* y *rifts*. Esta estructura tipo *horts* resalta, principalmente, en la parte central del campo geotérmico. Otros bajos gravimétricos y altos magnéticos más pequeños, podrían tratarse de intrusiones locales, fallas, conductos de los volcanes o derrames sepultados.



**Figura 1.4.** Modelo bidimensional de los perfiles gravimétricos y magnéticos (reducido al polo) (García y González, 1998). a) Los círculos y línea continua en color rojo representan los datos gravimétricos observados y modelados; asimismo, las cruces y línea continua en color azul representan a los datos magnéticos observados y modelados. Las unidades gravimétricas y magnéticas son miligales (mgal) y nanoteslas (nT) respectivamente. b) Interpretación del modelo bidimensional y su correlación con la estratigrafía del CVGTV representadas por bloques en color anaranjado. La elevación está dada en metros (m).

*Gómez et al., 2010*, elaboraron el modelo geotérmico de Las Tres Vírgenes a partir del estudio de 230 sondeos transitorio electromagnéticos (TDEM) registrados en los años 1999, 2008 y 2009 y la recopilación de los estudios geológicos, geoquímicos y sísmicos disponibles hasta esa fecha (Figura 1.5). Con base en estos estudios, los autores indican que la fuente de calor del campo geotérmico debe tratarse de una cámara magmática, pero con la información disponible no se pudo precisar la dimension y localización de la misma. Sin embargo infieren que debería tratarse de una cámara relativamente grande y que se ubicaría por debajo del volcán El Azufre.

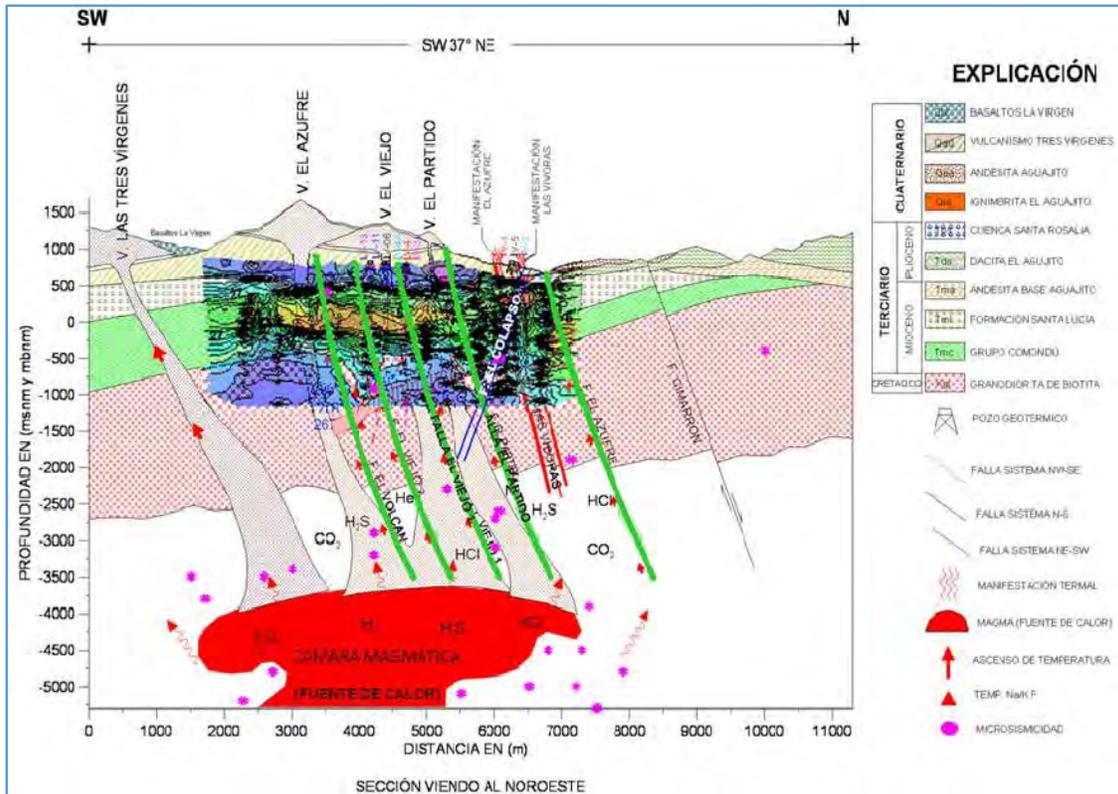
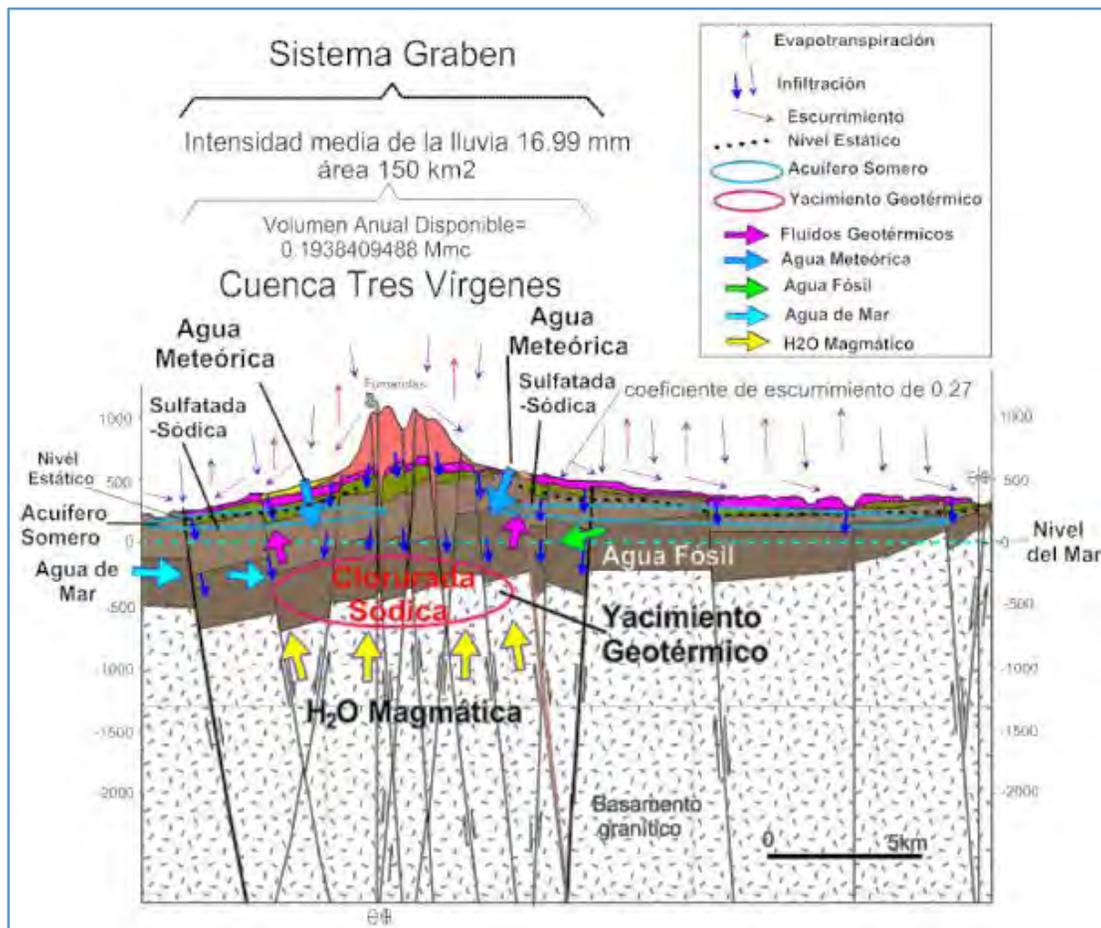


Figura 1.5. Modelo geotérmico de Las Tres Vírgenes, elaborado por Gómez et al. (2010).

*Benton et al. (2011)*, efectuaron estudios geohidrológicos de la Cuenca de Tres Vírgenes y complementaron la información geológica y tectónica; como resultado de la integración de estos estudios, los autores elaboraron el modelo geohidrológico de Las Tres Vírgenes (Figura 1.6). Este modelo con orientación N-S, sugiere que el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes e incluso la Caldera Aguajito están sobre un graben que inicia desde la zona costera de la Caldera Aguajito y que los bloques hundidos del graben están por debajo del nivel del mar. Además, sugieren la presencia de acuíferos someros semiconfinados. El yacimiento geohidrológico-hidrotermal profundo, ubicado a profundidades mayores a los 700 m, estaría separado del acuífero somero por capas sello impermeables constituídas por rocas volcánicas del CVTV. Los resultados geoquímicos de los acuíferos presentan una componente de agua de

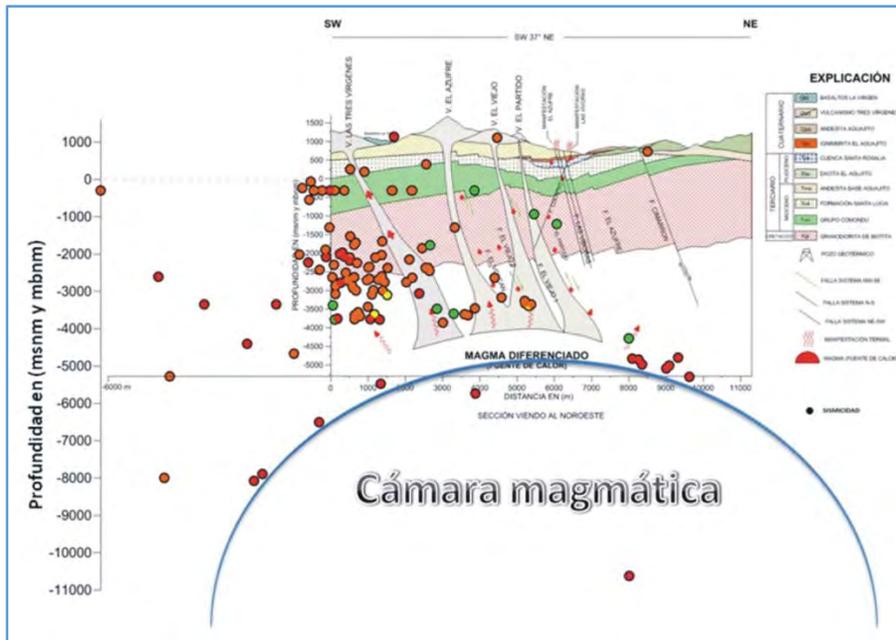
mar, probablemente infiltrada a través los sistemas de fallamiento y formaciones que ponen en contacto al mar con la zona geotérmica de Tres Vírgenes.

**Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013)**, analizaron la sismicidad registrada en el periodo 2000-2011. Con esta información, actualizaron el modelo geotérmico conceptual de **Gómez et al. (2010)** (Figura 1.7). Los autores infieren la presencia de una brecha sísmica a los 5500 m, con un alineamiento de la sismicidad con forma redondeada, como si se tratara de la cima de un lacolito y estaría asociado a la probable caracterización de la cámara magmática del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes.



**Figura 1.6.** Modelo hidrogeológico conceptual de Las Tres Vírgenes, elaborado por **Benton et al. (2011)** con orientación N-S.

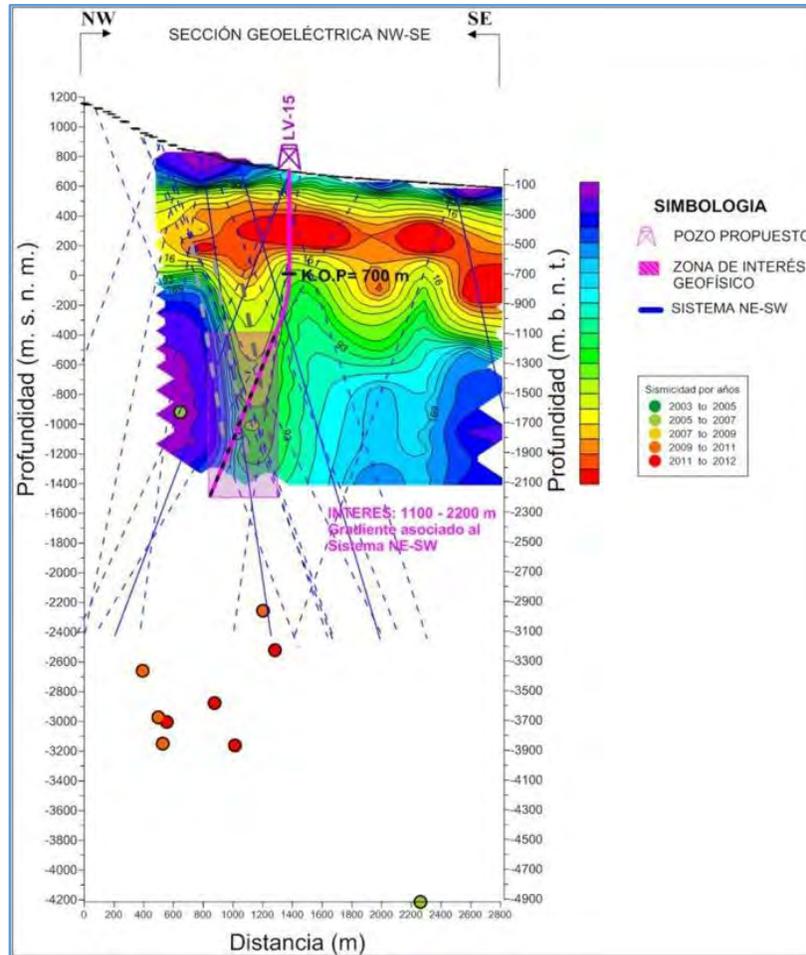
**Soto-Peredo (2014)**, recopiló evidencias geofísicas para sustentar la perforación de un nuevo pozo (LV15) (Figura 1.8); para ello, analizó la información sísmica registrada entre el 2003 y 2011 y lo correlacionó con un sistema estructural previamente cartografiado y confirmó la existencia de un plano de falla normal. Esta información en conjunto con otros estudios, habrían evidenciado las condiciones favorables de permeabilidad para el aprovechamiento geotérmico y por lo tanto, la factibilidad de perforar el pozo LV15.



**Figura 1.7.** Actualización del modelo conceptual de Gómez et al. (2010), con la integración de la sismicidad registrada en el periodo 2000-2011 (Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo, 2013).

Desde la perforación del primer pozo (LV2) en octubre de 1986, hasta la actualidad, se cuenta con 11 pozos entre productores (5), inyectores (3) y de exploración (3) (Hernández et al., 2010; Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo, 2013; Soto-Peredo, 2014). Del total, 5 pozos productores (LV4A, LV6, LV11 y LV13D) y uno inyector (LV8) se mantienen operativos, generando 9.6 MW de energía eléctrica, limpia y de bajo costo. Sin embargo, los estudios, con fines de ampliación del campo geotérmico, no han cesado; por el contrario, se han intensificado y, este estudio, es una muestra de ello.

En este contexto, se analizan: la actividad sísmica registrada durante el periodo 2003-2013, Este análisis permitirá conocer sus parámetros hipocentrales, su distribución espacial y en profundidad, su evolución temporal, el mecanismos que los genera y su correlación con la inyección de agua en el yacimiento geotérmico. Asimismo, a partir de la atenuación de las ondas sísmicas y valores *b*, se identificará “zona anómalas” que podrían estar asociadas al recurso geotérmico o la fuente de calor. Se analiza la información aeromagnética y su implicancia en el CVGTV, su correlación con la geología y la tectónica regional y local. Asimismo se estima la profundidad a la temperatura de Curie. La información magnetoteléfrica obtenida entre los años 1992 y 1994, es reprocesada para analizar la distribución de la resistividad en el subsuelo e identificar zonas de baja resistividad y asociarlas a la geología, tectónica y la posible fuente de calor.



**Figura 1.8.** Perfil en dirección NO-SE, con la integración de estudios tectónicos, sísmicos y de resistividad para la propuesta de perforación de un nuevo pozo, en el CVGTV (Soto-Peredo, 2014).

## 1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Con los antecedentes expuestos previamente, esta tesis doctoral pretende abordar los siguientes objetivos:

- 1) Procesar y analizar la información sísmica registrada en el campo geotérmico de las Tres Vírgenes, correspondiente al periodo 2003-2013, e identificar los mecanismos que los genera.
- 2) Analizar e interpretar la información aeromagnética y estimar la profundidad del basamento y a la temperatura de Curie.
- 3) Procesar y analizar la información magnetotelúrica e identificar discontinuidades de resistividad. Realizar secciones a diferentes profundidades y correlacionarlos con la distribución de la sismicidad, distribución de los sistemas de fallas y la posible fuente de calor.

- 4) Integrar toda esta información y proponer la caracterización sísmica, aeromagnética y magnetoteléfica del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes.

### 1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

A continuación se describe, de manera resumida, el contenido de cada uno de los capítulos que conforman esta tesis:

En el **Capítulo 1**, se presenta la introducción de la tesis, con una breve descripción de los campos geotérmicos en México, haciendo énfasis en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV). Se describen, los estudios previos, se plantean los objetivos del estudio, y se presenta la estructura de la tesis.

En el **Capítulo 2**, se describe los aspectos geológicos y tectónicos del CVGTV y las características principales de los pozos de producción e inyección instalados hasta la fecha, en particular, de los pozos LV8 (inyector) y LV6 (productor).

En el **Capítulo 3**, se realiza el procesamiento y análisis de la actividad sísmica registrada durante el periodo 2003-2013. Se correlaciona la distribución de los sismos con los procesos de inyección y pruebas de operación de los pozos. Se evalúa el estado de esfuerzo y su correlación con la tectónica local. Se estiman los parámetros de fuente, la atenuación sísmica  $Qc^{-1}$  y la tomografía del *valor b*.

En el **Capítulo 4**, se procesan los datos aeromagnéticos y los resultados son analizados regionalmente. Se identifican dominios magnéticos asociados con la geología y la tectónica y se estima la profundidad del basamento a la temperatura de Curie.

En el **Capítulo 5**, se presentan los resultados del procesamiento de los datos magnetoteléficos (MT). Se analizan la dimensionalidad y el *strike* regional. Se analiza la inversión tridimensional (3D), se correlaciona con los estudios magnetoteléficos previos de [Romo et al. \(2005\)](#), la geología, la tectónica, y la sismicidad registrada durante el periodo 2003-2013.

En el **Capítulo 6**, se analizan y discuten los resultados obtenidos y se presenta la caracterización sísmica, aeromagnética y magnetoteléfica del CVGTV.

En el **Capítulo 7**, se presentan las conclusiones y las recomendaciones respectivas.

Finalmente, se presenta la **Bibliografía** utilizada en el desarrollo de este estudio, la lista de figuras, la lista de tablas y los anexos respectivos.

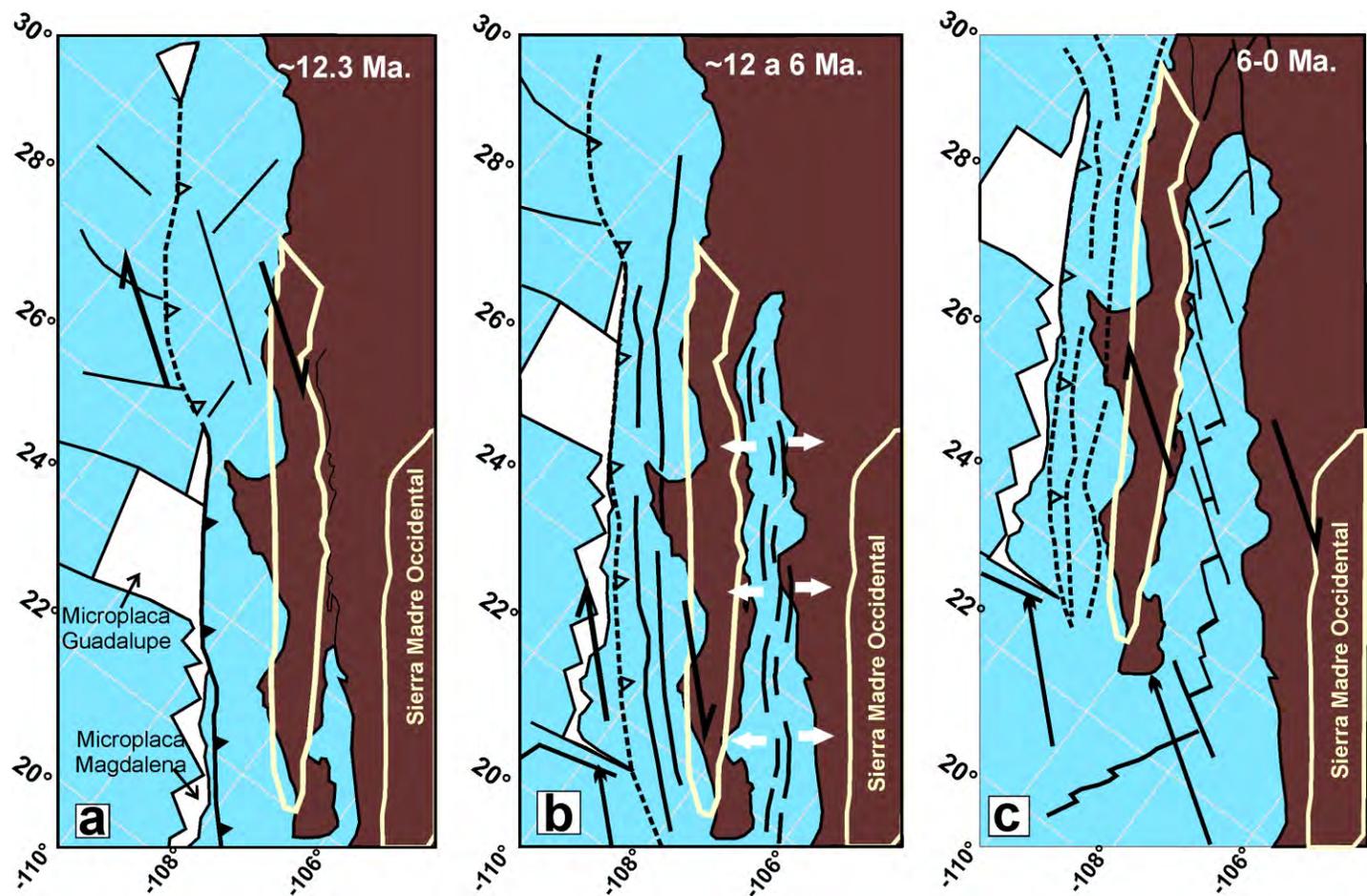
## CAPÍTULO 2

## ASPECTO TECTÓNICO, FISIOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

## 2.1 TECTÓNICA REGIONAL

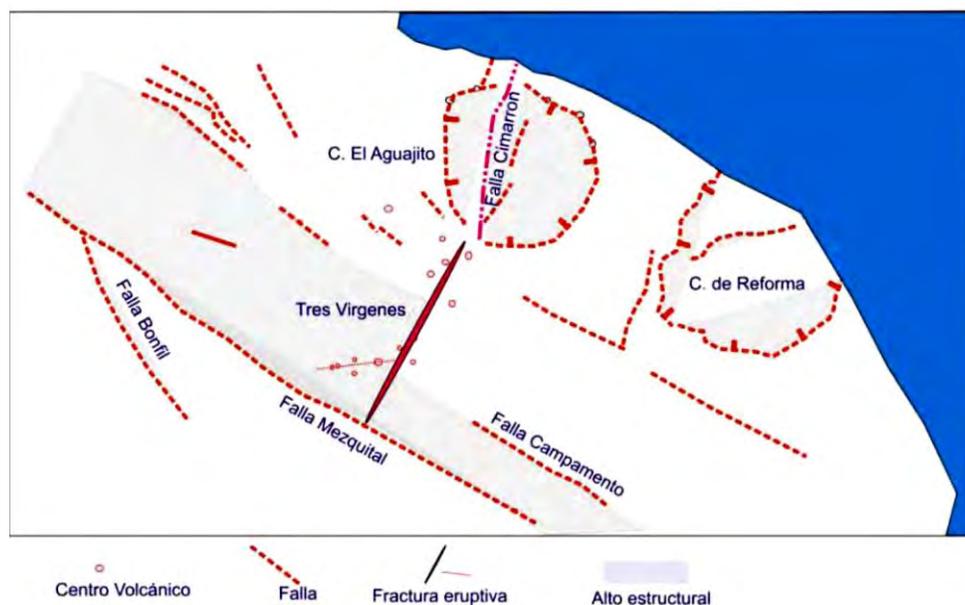
El CVGTV se ubica dentro del dominio tectónico transtensional del sistema de fallas laterales derechas asociadas a la separación de Baja California del occidente de México. Este proceso se habría iniciado hace ~12 Ma. (Atwater, 1970; Colleta y Angelier, 1981; Stock y Hodges, 1989; Atwater y Stock, 1998), pasando transicionalmente, de un ambiente de subducción de las placas Farallón y Guadalupe por debajo de la placa Norteamericana, a un ambiente de *rift* después de ~5 Ma. (Smith y Bruhn, 1984; Stock y Lee, 1994). Entre el proceso de apertura de Baja California y la configuración actual de Golfo de California, se presentaron fenómenos tectónicos importantes que explican, la ubicación del CVGTV (Wilson, 1948; Atwater, 1970; Schmidt, 1975; Colleta y Angelier, 1981; Smith y Bruhn, 1984; Stock y Hodges, 1989; López et al., 1994; López, 1998; López et al., 2003; Fletcher et al., 2007; Gómez y Rocha, 2009; Benton et al., 2011; Macías et al., 2011; Macías y Jiménez, 2012, 2013; Fernández, 2014) (Figura 2.1). Así:

- Durante el Cretácico Tardío (~80 Ma.), se desarrolla el proceso transpresivo, originado por la subducción de la placa Farallón por debajo de la placa Norteamérica, ocasionando extensión en dirección noreste-suroeste (NE-SO) que dio origen al vulcanismo en la costa del Pacífico; asimismo, por el bajo ángulo de subducción, habría emplazado el batolito de California (López et al., 1994).
- En el Terciario, continuando la subducción de la placa Farallón, se produce la llamada Orogenia Laramide de la cordillera Norteamericana (Dickinson y Lawton, 2001; Nieto-Samaniego et al., 2006), ocasionando el levantamiento del batolito y dando lugar a la formación Comondú.
- Durante el Oligoceno, se originó extensión y por ende, la formación de sistemas de fallas en dirección NE-SO y noroeste-sureste (NO-SE) que fueron ocasionadas por el sistema conocido como “doble unión triple”, unidos por un sistema transformante (Wilson, 1948), lo que produce un deslizamiento lateral, por la división de la placa Farallón y dando lugar a las placas Juan de Fuca y Cocos.
-



**Figura 2.1.** Reconstrucción tectónica de la Península de Baja California. a). Configuración inicial de la Península de Baja California. b) Apertura y formación del proto-golfo (Stock y Hodges, 1989; Fletcher et al., 2007; Fernández, 2014). c) Configuración actual del Golfo de California. Las flechas en colores negro y blanco indican el movimiento relativo de placas y la separación del Golfo de California respectivamente. Las líneas en color blanco representan las provincias fisiográficas (modificado de Fletcher et al., 2007 y Fernández, 2014).

- En el Mioceno, se emplazaron los depósitos volcano-sedimentarios del Grupo Comondú y la Formación Santa Lucía (13-24 Ma). En el Mioceno Medio, a la edad aproximada de 12.3 Ma., la península de Baja California continuaba formando parte de la Placa Norteamericana (Figura 2.1a) (Stock y Hodges, 1989; Fletcher et al., 2007; Fernández, 2014). Sin embargo, a los 12 Ma., con la finalización del proceso de subducción de la placa Farallón por debajo de la placa Norteamericana, se inicia el régimen transpresivo con dirección NO-SE. Al final del Mioceno Medio, cambia el régimen transpresivo, al de extensión con dirección NE-SO a E-O, originando las fallas normales NO-SE, tiempo durante el cual, habría reactivado a las fallas La Virgen, El Azufre, El Viejo y las Víboras. En el Mioceno Tardío, ocurrió emplazamiento fisural La Esperanza de ~7.74 Ma.
- En el Plioceno, se habría iniciado el emplazamiento y la apertura del Golfo de California, reactivando los sistemas de fallas normales con dirección NE-SO como consecuencia del régimen extensional en dirección NO-SE (Figura 2.1c) (Fletcher et al., 2007; Fernández, 2014).
- En el Pleistoceno Tardío (~0.7 Ma), ocurrieron actividades volcánicas explosivas de tipo ignimbrítico, dando lugar a la formación de la caldera El Aguajito, además de una serie de domos que se emplazaron dentro de la caldera.
- En el Pleistoceno Reciente (Cuaternario), en la zona del CVGTV, se habría generado una debilidad cortical representada por la falla Cimarrón. Posteriormente, habría dado lugar al vulcanismo de Las Tres Vírgenes (Macías et al., 2011) (Figura 2.2).



**Figura 2.2.** Principales estructuras volcánicas y formación del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes durante el Mioceno-Plioceno (Macías et al., 2011).

## 2.2 FISIOGRAFÍA Y GEOLOGÍA REGIONAL

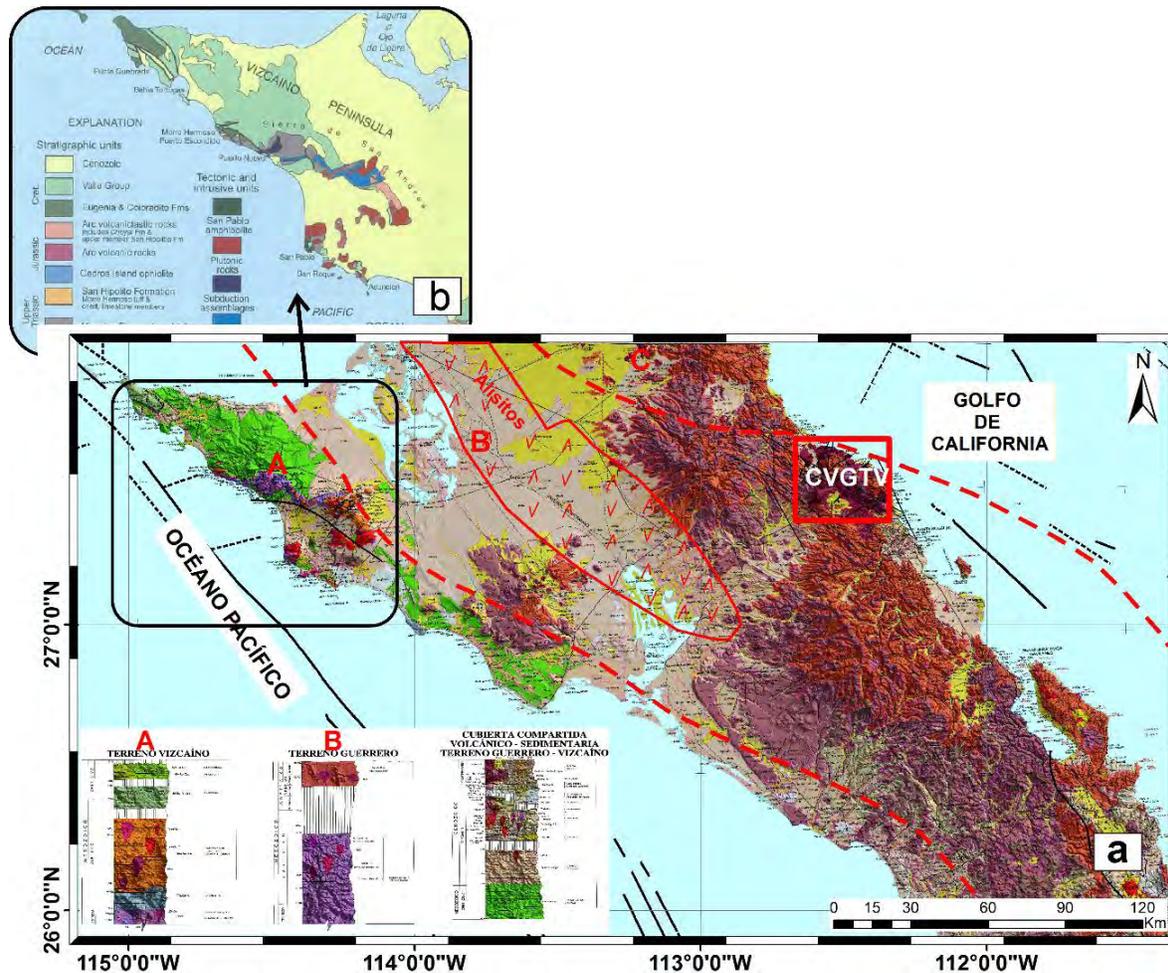
La península de Baja California se ubica en la provincia fisiográfica del mismo, su extensión de ~1430 km incluye los estados de Baja California y Baja California Sur. Por sus características litológicas y tectónicas, esta provincia, se subdividió, a su vez, en 3 terrenos tectonoestratigráficos: Vizcaíno o Cochimi (A), Alisitos-Guerrero o Yuma (B) y Caborca o Seri (C) (Moore, 1983; Sedlock et al., 1993; Centeno-García et al., 2008, 2011) (Figura 2.3). Por su distribución en el Estado de Baja California Sur (zona regional de estudio) y sobrepuesta a la Carta Geológica-Minera Estatal de Baja California Sur, Esc. 1:500,00 ([https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/california\\_sur.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/california_sur.pdf)), se describen, solamente, los terrenos Vizcaíno (A) y Alisitos-Guerrero (B).

- El primero denominado, también, como San Sebastián Vizcaíno (Cochimi), se ubica al oeste de la Península de Baja California y está constituida por rocas metamórficas que forman un *melange* acrecionario constituida por las ofiolitas de Puerto Nuevo, ofiolitas La Costa en Punta San Pablo y por el arco de rocas volcánicas y volcanoclásticas que van desde el Jurásico hasta el Cenozoico (Moore, 1983; Sedlock et al., 1993) (Figura 2.3).
- El segundo, denominado como Alisitos-Guerrero (Yuma) donde, además, se ubica el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) (Figura 2.3), constituye la tercera parte de los terrenos de México. Se ubica en la parte central y este de la península de Baja California, está conformado, por secuencias de rocas sedimentarias del Triásico-Jurásico hacia el este y de secuencias de rocas volcánicas volcanoclásticas del Jurásico-Cretácico hacia el oeste. En cuanto a su origen, se propusieron dos modelos: de arco exótico, donde se postula que los arcos oceánicos o de isla fueron acrecionados por el proceso de subducción hacia el oeste (O); por lo tanto, se cierra toda una cuenca oceánica situada entre el arco y el continente, lo que sugiere que el material derivado de la margen continental mexicana podría no ser encontrado dentro del arco (Tardy et al., 1994; Dickinson y Lawton., 2001), y el modelo de franja de arco, postula que uno o varios arcos oceánicos o arcos de isla se desarrollaron cerca de la margen continental mexicana (Campa y Ramírez, 1979; Centeno-García et al., 2008, 2011; Martini et al., 2009).

## 2.3 GEOLOGÍA Y TECTÓNICA LOCAL

La geología y tectónica local ha sido ampliamente estudiada por varios autores, entre ellos: López et al. (1993), López (1998), Gómez y Rocha (2009) (Figura 2.4), Benton et al. (2011) (Figura 2.5), Macías et al. (2011) (Figura 2.6), Macías y Jiménez (2012, 2013) y corresponde a la síntesis de las diferentes columnas litológicas elaboradas a partir de la perforación de los pozos (Figura 2.4a). La presencia de las calderas La Reforma, El Aguajito y el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV), además de los diferentes sistemas de fallas NO-SE,

norte-sur (N-S) y NE-SO (Figura 2.7) y las condiciones termodinámicas en el subsuelo, favorecieron el desarrollo geotérmico. Estas estructuras volcánicas se constituyen como ejemplos visibles de la compleja evolución geológica y tectónica de esta zona que, según López (1998), aún conservan su fuente de origen desde que cesó la subducción, hace 12 Ma. Así:



**Figura 2.3.** a) Terrenos tectono-estratigráficos y geología regional del estado de Baja California Sur. Las líneas discontinuas en color rojo separan los terrenos tectonoestratigráficos: Vizcaíno o Cochimi (A), Alisitos-Guerrero o Yuma (B) y Caborca o Seri (C) (Moore, 1983; Sedlock et al., 1993; Centeno-García et al., 2008, 2011). En la parte central se muestra el arco y/o antearco de Alisitos (polígono en color rojo) (Tardy et al., 1994; Dickinson y Lawton, 2001). El cuadro en color rojo muestra la ubicación del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) dentro del terreno Alisitos-Guerrero (B) (Modificado del SGM, 2003; Centeno-García et al., 2011). b) Ampliación del complejo ofiolítico de Puerto Nuevo, ubicado en el terreno Vizcaíno (A) (Moore, 1983).

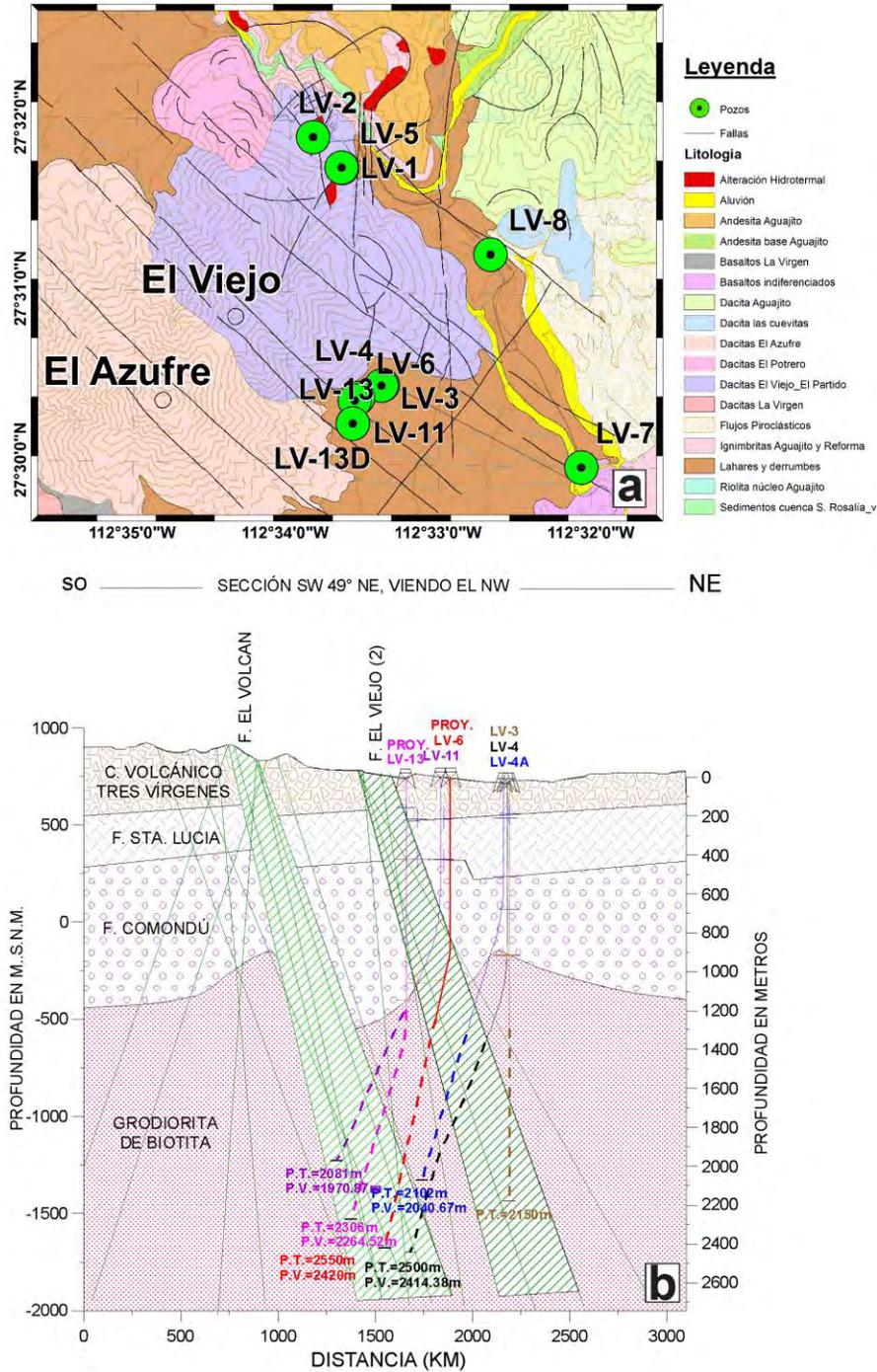
- La caldera **La Reforma**, de 1240 msnm, es una caldera resurgente, datada en 1.09 Ma por Schmidt (1975). Esta caldera presenta un escarpe de colapso de ~11 km de diámetro y abierto hacia el NE (Macías et al. 2011). En la parte central de esta caldera se muestra un bloque de ~700 m sobre la margen de la caldera y está compuesta por flujos de ceniza soldada, tobas y lavas, típicos de un domo de caldera resurgente (Hausback et al., 2000). Adicionalmente, en el domo resurgente fueron reportados la presencia de rocas graníticas del Mesozoico.
- **El Aguajito**, tiene una edad de ~0.76 Ma (Garduño-Monroy et al., 1993). Está conformada por relieves de hasta 1120 msnm y compuesta por una intercalación de areniscas marinas con depósitos piroclásticos, lavas y domos. La falla representativa del Aguajito es la falla El Cimarrón con orientación NNE-SSO y forma parte de la fractura eruptiva asociada al vulcanismo de Las Tres Vírgenes. Los flancos este (E) y oeste (O).
- **El Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes (CVTV)**, está compuesto por tres volcanes orientados en dirección NE-SO, desde el más antiguo hasta el más reciente: El Viejo, El Azufre y La Virgen, con edades de 0.44 m.a, 0.28 m.a y actividad histórica (1746) (López et al., 1993; López, 1998) Este complejo volcánico está compuesto por rocas basálticas a dacíticas (Sawlan, 1986). El volcán El Viejo tiene una altura de 1245 msnm y una base de 680 msnm y está controlado por un drenaje paralelo de orientación NNE-SSE. El Azufre con una altura de 1600 msnm y una base a 770 msnm, también presenta un drenaje profundo semejante al del Viejo, pero sus flancos tienen un drenaje radial. La Virgen tiene una altura de 1927 msnm y una base a 545 msnm. Todo su flanco norte está ocupado por productos efusivos, los cuales parecen enmascarar un colapso abierto hacia el NNO.

De acuerdo con López et al. (1993), López (1998), Gómez y Rocha (2009), Benton et al. (2011), Macías et al. (2011) y Macías y Jiménez (2012, 2013), el Campo Volcánico y Geotérmico de las Tres Vírgenes (CVGTV) está conformado por las siguientes unidades (Figuras 2.4, 2.5 y 2.6):

- **Las Dacitas El Viejo**, con espesores variables entre 65 y 231 m. Dacitas de augita y andesitas, emitidas por el CVTV, además de depósitos aluviales.
- **Las Ignimbritas Aguajito**, con espesores de 3 a 187 m y están constituidas por rocas pómez, andesitas, riolitas y obsidiana que son productos emitidos por erupciones de las calderas La Reforma y El Aguajito. La edad estimada es de 0.76 ma (Pleistoceno).
- **La Formación Cuenca Santa Rosalía**, con espesores entre 54 y 258 m. Está conformada por sedimentos marinos, dacitas submarinas y andesitas de la caldera El

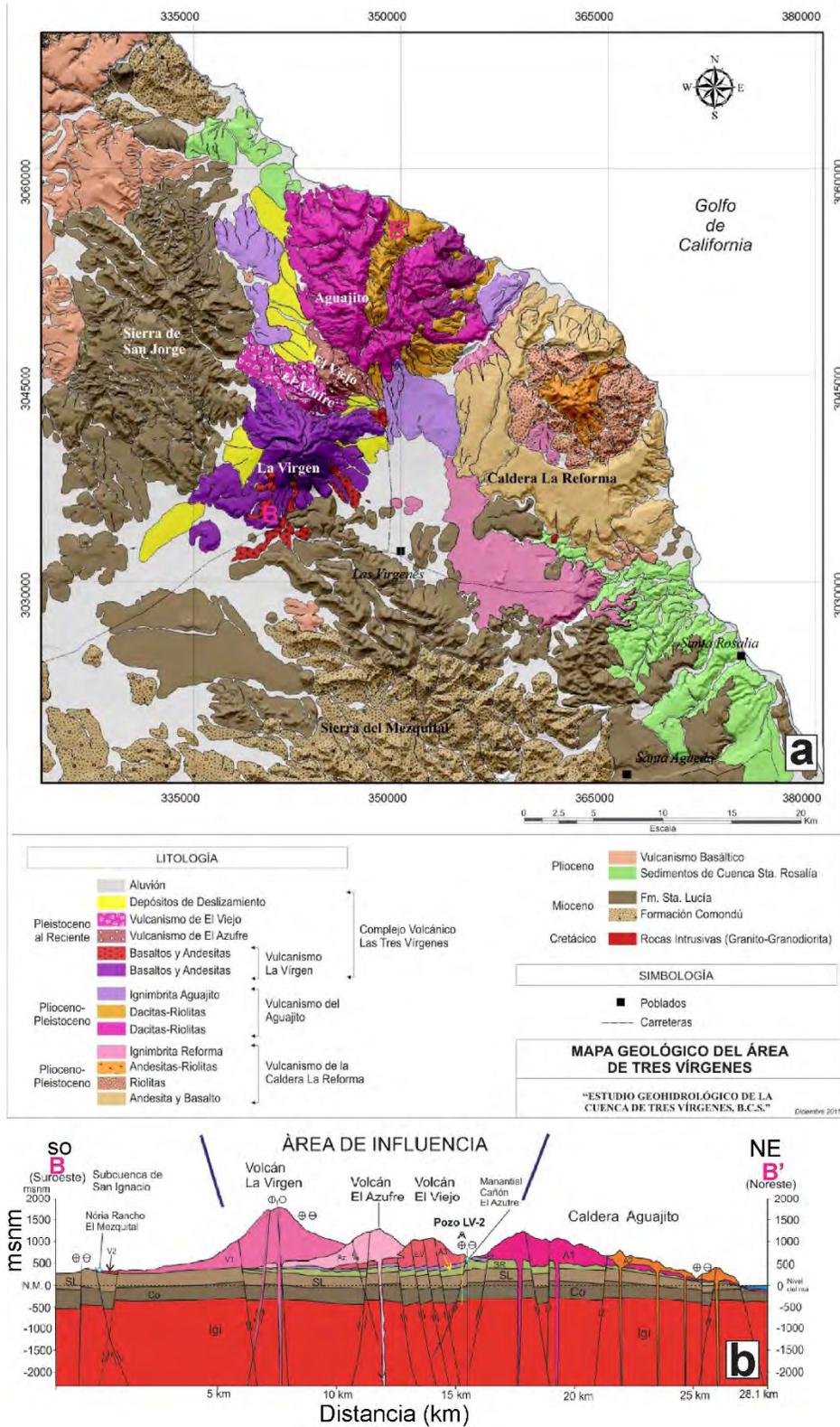
## CAPÍTULO 2. ASPECTO TECTÓNICO, FISIOGRAFICO Y GEOLÓGICO

Aguajito. Estos depósitos se ubican al norte de la falla El Partido. La edad estimada corresponde al Plioceno Inferior-Medio.



**Figura 2.4.** a) Mapa geológico estructural y b) perfil estratigráfico, en dirección SO-NE del CVGTV; ambos elaborados por Gómez y Rocha (2009). LV-1 a LV-13 son los pozos perforados. Las líneas en colores azul y rojo (pozo LV6) muestran las profundidades máximas de perforación.

## CAPÍTULO 2. ASPECTO TECTÓNICO, FISIOGRÁFICO Y GEOLÓGICO



**Figura 2.5.** Mapa geológico y perfil estratigráfico en dirección S0-NE del CVGTV elaborados por Benton et al. (2011). La escala vertical esta dada en metros sobre el nivel mar (msnm) y la distancia en kilómetros (km).

## CAPÍTULO 2. ASPECTO TECTÓNICO, FISIOGRAFICO Y GEOLÓGICO

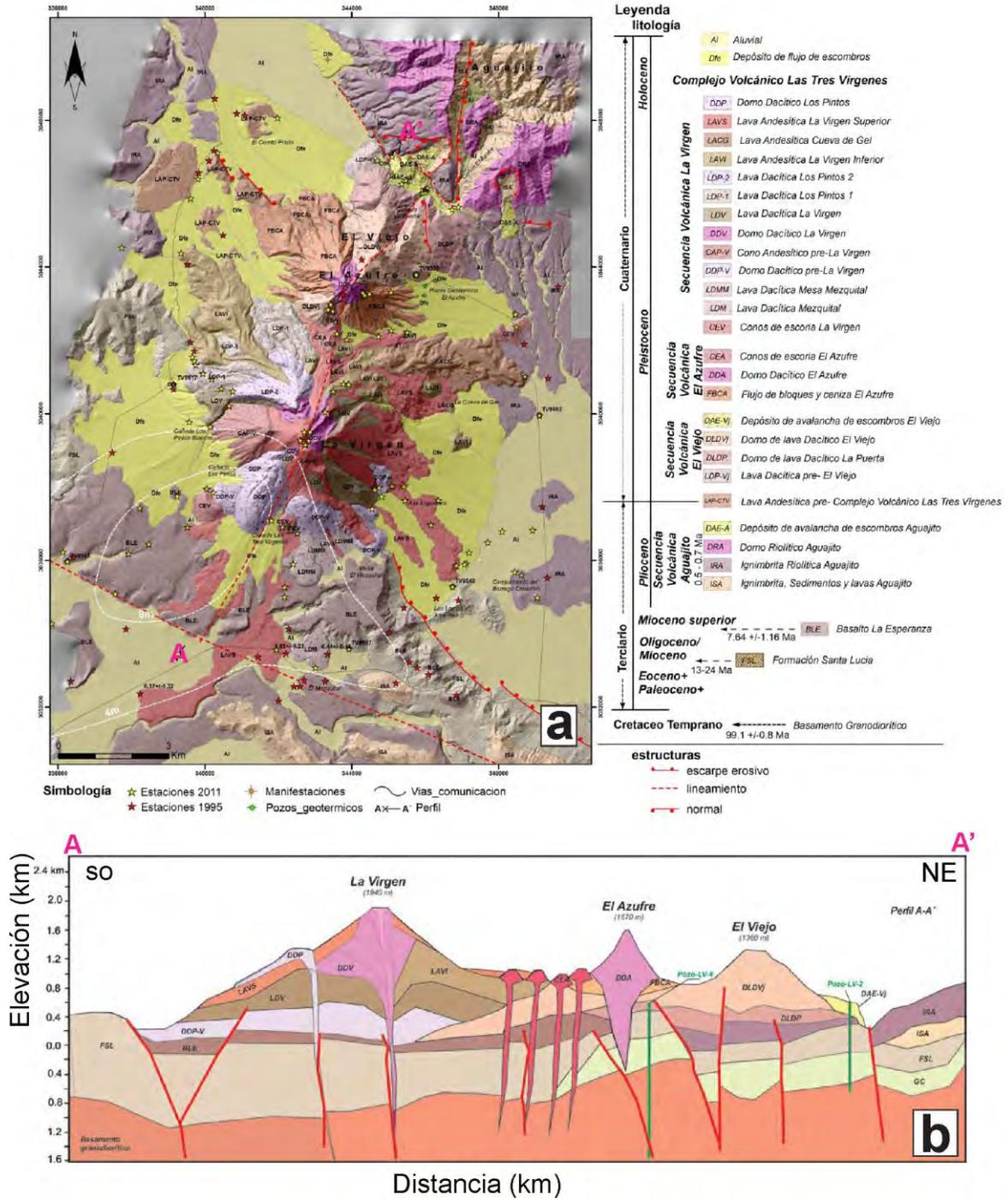


Figura 2.6. a) Mapa geológico-vulcanológico y b) perfil estratigráfico en dirección SO-NE del CVGTV elaborados por Macías et al. (2011). Las elevación y la distancia del perfil está dada en kilómetros (km).

- **La Formación Santa Lucía**, con espesores variables entre 208 y 409 m. Está conformada por andesitas, basaltos y lahares andesíticos. La edad estimada de esta formación varía entre 13 y 5 ma (Mioceno Superior-Plioceno Inferior).

- **La Formación Comondú**, presenta espesores de 235 a 728 m. Está conformada por secuencias de rocas volcánicas: tobas, areniscas y conglomerados, cuerpos delgados de andesita, basalto o diques y areniscas. La edad estimada por [Sawlan \(1986\)](#) varía entre 26 y 19 Ma (Mioceno Inferior).
- **El basamento**, está conformado por granodiorita de biotita. La edad estimada varía entre 81 a 84 ma (Cretácico Superior). La profundidad del inicio de esta unidad, aún no fue delineada con detalle debido al alcance, en profundidad, de los pozos hasta hoy perforados, sin embargo, de la información disponible de los previos y el último pozo perforado en el año 2009 (LV6), las profundidades de inicio varían entre 1000 y 1040 m, desconociéndose la máxima profundidad.

En la [Figura 2.7a](#) se presenta la agrupación de los sistemas de fallas identificados por [Gómez y Rocha \(2009\)](#), [Benton et al. \(2011\)](#), [Macías et al. \(2011\)](#) y [Macías y Jiménez \(2012, 2013\)](#) y en la [Figura 2.7b](#) la ampliación de la zona central del CVGTV e identificada en la [Figura 2.7a](#) con un recuadro de color rojo transparente. De acuerdo con los estudios estructurales, el CVGTV presenta 4 sistemas tectónicos principales:

- 1) **Sistema NO-SE**, asociada a la apertura del Golfo de California ([Colleta y Angelier, 1981](#)). Es uno de los sistemas más importantes y están representadas por las fallas normales La Virgen, El Azufre, El Volcán, El Viejo 1 y 2, Las Víboras, El Partido, Mezquital y Bonfil; estas dos últimas evidenciadas por [Macías et al. \(2011\)](#) y [Macías y Jiménez \(2012, 2013\)](#). Entre estas fallas, también fueron identificadas otras fallas menores, con buzamientos opuestos (NE y SO) y clasificadas como *fallas conjugadas* ([Figura 2.7b](#)) ([Gómez y Rocha, 2009](#)).
- 2) **Sistema N-S**, segundo sistema en importancia y responsable del emplazamiento del CVTV. Está conformado por fallas laterales con componentes normales y representados por las fallas El Colapso y El Cimarrón.
- 3) **Sistema NE-SO**, representada por las fallas El Álamo ([López et al., 1993](#)), ubicada en la parte sur y El Aguajito ([Benton et al., 2011](#)) en la parte norte. Éstas, a su vez, actuarían como límites de la zona de influencia del campo geotérmico por medio de *horsts y graben* ([Benton et al., 2011](#)).
- 4) **Sistema E-O**, asociado a los movimientos transpresivo y transtensivos. Debido a su mínima representatividad en el CVGTV, estos no fueron estudiados con mayor detalle.

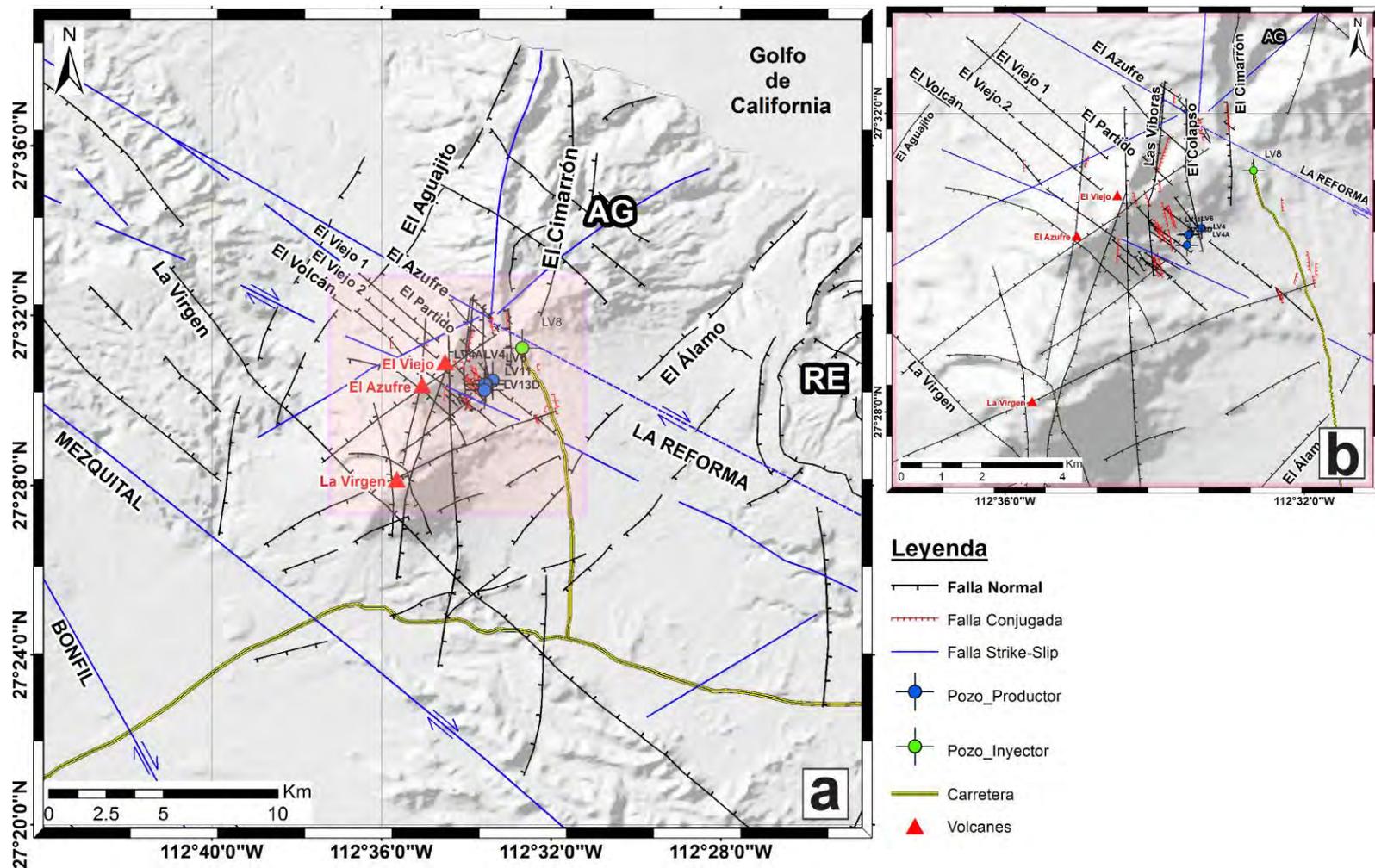


Figura 2.7. a) Mapa tectónico local, sintetizado de los estudios de López et al. (1993), Gómez y Rocha (2009), Benton et al. (2011), Macías et al. (2011), Macías y Jiménez (2012, 2013) y ubicación de los pozos. AG= caldera El Aguajito; RE= caldera La Reforma. b) Ampliación de la zona central del CVGTV e identificada, en la Figura 2.7a, con un recuadro de color rojo transparente.

## 2.4 POZO INYECTOR LV8 Y PRODUCTOR LV6

La perforación del primer pozo (LV2), en el CVGTV, fue realizada en octubre de 1986. Desde esa fecha hasta hoy en día, se contabilizan 11 pozos perforados, 4 pozos productores (LV4A, LV6, LV11 y LV13D) (Figuras 2.4a y 2.7) que proveen de vapor geotérmico a dos plantas de generación de 5 MW cada una; 3 pozos inyectores (LV1, LV5, LV8), de los cuales solo el pozo LV8 opera continuamente y 4 pozos son de exploración (Hernández et al., 2010; Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo, 2013; Soto-Peredo, 2014). Para los fines de este estudio, se describen las características principales del pozo inyector LV8 y productor LV6.

El pozo inyector LV8 fue construido entre el 20 de diciembre de 1997 y 7 de abril de 1998 (Hernández y Ramírez, 2009) (Figuras 2.4a y 2.7). La profundidad alcanzada fue de 1.715 km, con desplazamiento horizontal de 0.271 km y una profundidad vertical de 1.671 km. La inyección de agua en este pozo inició de manera intermitente el 16 de abril de 1999 y constante desde el año 2000. La cantidad promedio de inyección durante esos años fue entre 133 y 30 t/h. Durante periodos cortos de tiempo, este pozo fue sometido a procesos de limpieza, pruebas de recuperación y aceptación de mayor cantidad de inyección. Desde el 2009 hasta el 2013, los gastos inyectados en este pozo oscilan entre 80 y 281 t/h.

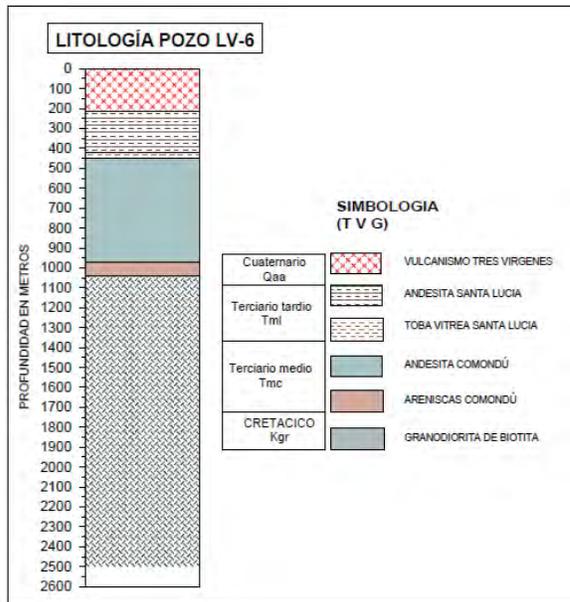
El pozo LV6, se ubica al sureste de los volcanes El Azufre y el Viejo, al norte del pozo LV12D y suroeste del pozo LV4A (Figura 2.4a y 2.7). La perforación de este pozo, inició el 25 de junio de 2009 y concluyó el 24 de diciembre del mismo año (Hernández et al., 2010). La profundidad alcanzada fue de 2.505 km.

Entre el 16 de diciembre de 2009 y 9 de marzo de 2010, se realizaron diversas pruebas de operatividad, entre ellas: lavado de pozo (16 y 17 de diciembre de 2009); pruebas de inyección con gastos de 40, 80 y 120 t/h (19 de diciembre); pruebas de inyección de ácidos, lavado y pos-lavado del pozo (del 26 al 28 de diciembre de 2009); pruebas de inyección de 4 horas con gastos de 120 y 80 t/h; inducción del pozo en la fase de calentamiento (2 de enero de 2010); inyección de aire (2 al 4 de enero de 2010) y procesos de acidificación (5 de enero de 2010). El 9 de marzo de 2010, se inició, formalmente, con la producción de vapor y el 15 de mayo se integró al sistema de generación de energía eléctrica. Desde el 2009 hasta el 2013, la producción de vapor presentó variaciones entre 60 y 120 t/h.

Durante el proceso de construcción, se obtuvieron muestras de roca cada 10 m, información importante que permitió elaborar, la columna estratigráfica y su descripción en profundidad es mostrada en la Figura 2.8 (Hernández et al., 2010). Asimismo, obtuvieron la composición mineralógica y observaron que hasta profundidades del orden de 1.03 km está compuesta de hematitas, óxidos, calcitas, arcillas, piritas, cuarzos y cloritas. Por la aparición de este último y su temperatura de formación, se considera la cima del yacimiento geotérmico. Entre las profundidades de 1.04 y 1.287 km, estaría formada de calcitas, arcillas, cloritas, piritas, cuarzo y epidotas. Por la aparición de la epidota, que tiene una temperatura de formación de

## CAPÍTULO 2. ASPECTO TECTÓNICO, FISIAGRÁFICO Y GEOLÓGICO

~250 °C, se consideró como el yacimiento geotérmico y se extendería hasta los 2.505 km, profundidad alcanzada durante la perforación del pozo LV6. En cuanto a la temperatura, a la profundidad de 1.24 km, registraron 177.67 °C y a 2.5 km hasta 290 °C.



**Tabla 5. Columna litológica del pozo LV-6**

PROFUNDIDAD (m)	FORMACIÓN	
0 – 313	Vulcanismo Tres Virgenes (Qaa)	
313 – 420	Andesita	Formación Santa Lucía (Tml)
420 – 450	Toba Vitrea	
450 – 970	Andesita	Formación Comondú (Tmc)
970 – 1040	Arenisca	
1040 – 2505	Granodiorita de Biotita (Kgr)	

**Figura 2.8.** Columna estratigráfica elaborada a partir de muestras de roca obtenidas cada 10 m, durante la perforación del pozo productor LV6 (lado derecho) y descripción resumida de la columna estratigráfica del pozo productor LV6 (lado izquierdo).

## CAPÍTULO 3

### ESTUDIO SISMOLÓGICO

#### 3.1 ANTECEDENTES

Los estudios sismológicos en campos volcánicos y geotérmicos contribuyen a conocer la distribución y caracterizar la fuente que los genera. Estudios previos demostraron que, la actividad sísmica se presenta, también, en forma de enjambres sísmicos. Aunque la literatura muestra varias definiciones de los enjambres, en general, son definidos como un conjunto de sismos de magnitud pequeña, que ocurren en una determinada área y en tiempos cercanos (horas, días, semanas) ([Programa de Riesgos Volcánicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos: USGS, 2016](#)). Esta definición es similar a los establecidos por [Vidale y Shearer \(2006\)](#) y [Chen y Shearer \(2011\)](#). Sin embargo, [Corral \(2003\)](#), define a los enjambres como actividad sísmica que no está asociada a un evento principal; por lo tanto no seguiría la ley de Omori, donde los eventos sísmicos decrecen inversamente proporcionales al tiempo del sismo principal.

Según, [Hill \(1977\)](#), los enjambres son limitados a regiones con propiedades de material heterogéneo y alta concentración de esfuerzos. [Mogi \(1963\)](#) y [Rubin \(1995a, 1995b\)](#), refieren que los enjambres ocurren debido a la intensa actividad tectónica (local y regional), concentración o perturbación en el régimen de esfuerzo debido a la presencia de fluidos. [Fournier \(1999\)](#) indica que la migración de los fluidos hidrotermales genera, también, la ocurrencia de enjambres sísmicos. Asimismo, los procesos magmáticos, tales como la migración del magma, inflación y deflación ([Shelly et al., 2013](#)), procesos de inyección de fluidos, producción, acidificación, estimulación y limpieza de pozos genera la ocurrencia de enjambres. Estos últimos fueron observados también por [Antayhua \(2007\)](#) y [Lermo et al. \(2008\)](#) en el campo geotérmico de Los Humeros (Puebla).

[Sminchak y Gupta, \(2003\)](#), [Baisch et al. \(2006\)](#), [Dorbath et al. \(2009\)](#), [Suckale \(2009\)](#), [Kwiatiek et al. \(2010\)](#), [Nicol et al. \(2011\)](#) y [Evans et al. \(2012\)](#) identificaron que la sismicidad local está correlacionada con la inyección de fluidos más que con los procesos de producción. De acuerdo a [Majer et al. \(2007\)](#), la inyección de fluidos ayuda a mantener la presión del reservorio e incrementa la producción, pero induce sismicidad local, debido a que perturba el régimen de esfuerzos de la zona, crea nuevas fracturas e introduce fluidos presurizados dentro de fallas pre-existentes, favoreciendo un anticipado desplazamiento de la falla, mucho antes de lo que podría ocurrir naturalmente ([Scholz, 1990](#)). Generalmente, los sismos asociados a los

procesos de inyección-producción se localizan alrededor o por debajo de los pozos e inclusive, migran fuera de la zona de inyección (Stark, 2003; Baisch et al., 2006; Kwiatek et al., 2010) adoptando formas relativamente circulares y elongadas. Las profundidades focales de estos sismos son menores a 10 km y en la mayoría de casos menor a 5 km (Sminchak y Gupta, 2003; Suckale, 2009; Nicol et al., 2011). Esta profundidad máxima de los sismos son interpretados, también, como la zona de transición entre las zonas frágil y dúctil respectivamente (Meissner y Strehlau, 1982), debido a la alta temperatura a profundidad. Este factor podría delinear la máxima profundidad de los sismos locales (Chen y Molnar, 1983).

Sin embargo, no sólo estos procesos propios de la explotación geotérmica de carácter local generarían la ocurrencia de sismos y enjambres sísmicos. Según los estudios de Hill et al. (1993), un sismo de magnitud mayor ( $M=7.3$ ) como el sismo de Landers (California) del 28 de junio de 1992, originó una serie de enjambres sísmicos en zonas volcánicas (Cascadas), geotérmicas (Geysers, Coso) y de fallas ubicadas al norte del epicentro del sismo y a distancias de hasta 1250 km. Asimismo, Prejean et al. (2004), analizaron los enjambres registrados en el Monte Rainier, en la caldera Long Valley y en los campos geotérmicos Geysers y Coso después de la ocurrencia del sismo de la falla Denali ( $M_w=7.9$ ) (Alaska) del 3 de noviembre de 2002. Los resultados mostraron, que los enjambres fueron disparados, localmente, por los cambios de esfuerzo, originados por la llegada de las ondas superficiales de baja frecuencia (15 a 40 s). La duración de la ocurrencia de estos enjambres, particularmente, en el Monte Rainier y la caldera Long Valley se prolongó hasta varios días después de ocurrido el sismo. Además de estos dos ejemplos, se pueden mencionar también a los sismos de 1997 de Hector Mine en California ( $M_w=7.1$ ) (Gomberg et al., 2001) y de 2001 el sismo de Pisco, Perú ( $M_w=8.1$ ) (Holtkamp et al., 2011), entre otros.

Debido a la complejidad de procesos que ocurren dentro de ambientes volcánicos y geotérmicos, diversos estudios sismológicos fueron llevados a cabo para entender el origen de la sismicidad, especialmente para intentar diferenciar la sismicidad inducida por procesos propios de la explotación geotérmica de aquellos que ocurren por procesos tectónicos naturales. *A priori*, una base de datos y una buena localización hipocentral, permite correlacionarlos con la tectónica de la zona en estudio, tanto en superficie como en profundidad. Los mecanismos focales o mecanismos de tensor de momento proveen información de la geometría y tipo de falla que los genera (Cuenot et al., 2008) e inferir el campo de esfuerzos.

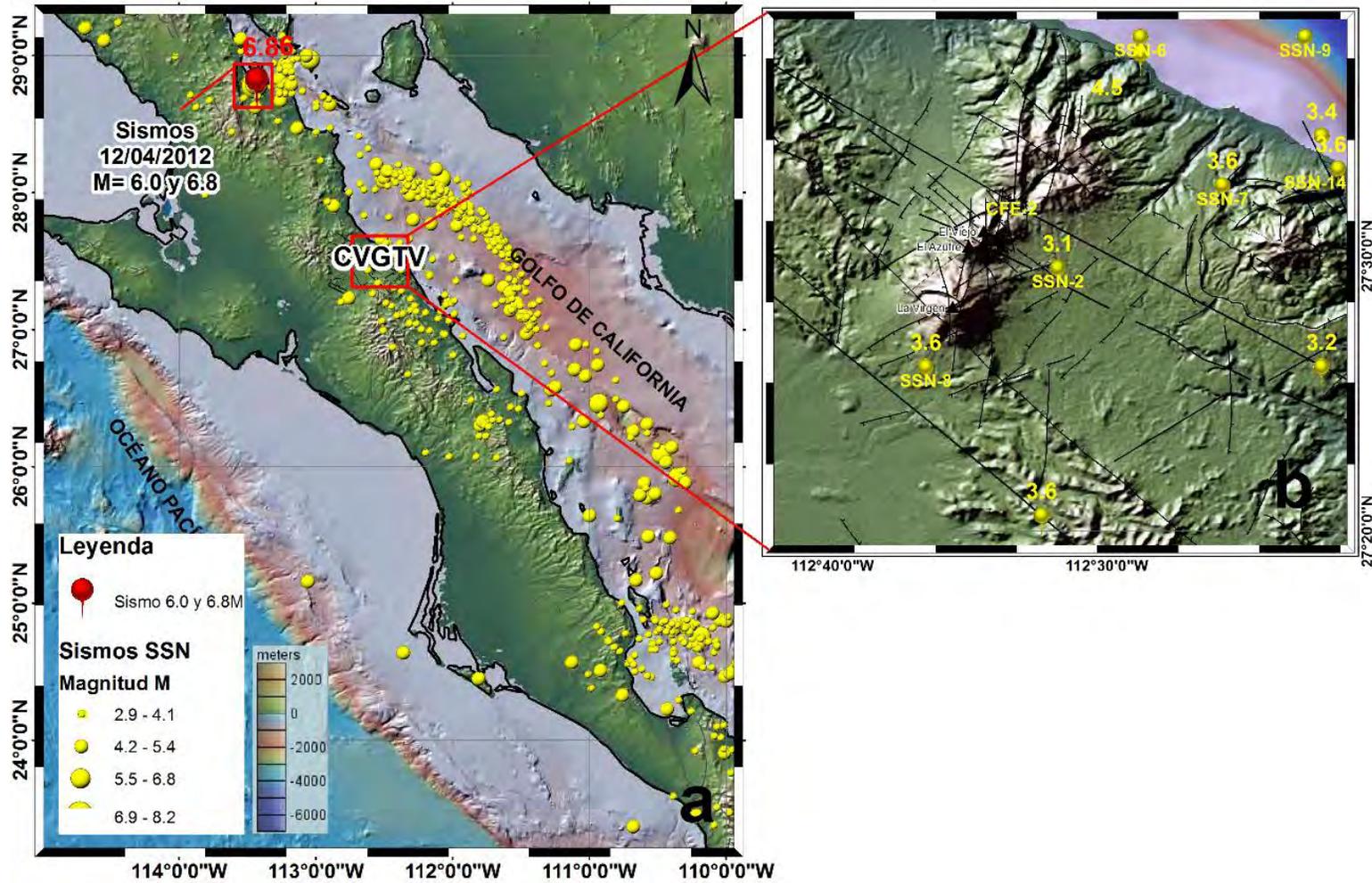
Otro parámetro que permite inferir las heterogeneidades de las zonas volcánicas y geotérmicas es el factor de calidad  $Q_c$  (coda  $Q_c$ ) o su inversa expresada en términos de atenuación sísmica ( $Q_c^{-1}$ ) y evaluada para diferentes rangos de frecuencia. Este factor introducido por Aki (1969) y extendido por varios autores (Aki y Chouet, 1975; Sato, 1977), asume que la parte final del sismo (coda) contiene información asociada con cambios de temperatura, contenido y viscosidad de fluidos (Gao, 1992) (atenuación intrínseca) y la tectónica local y/o regional (atenuación por dispersión o *scattering*). Dependiendo de la

estimación de los valores de  $Q_c$  (altos o bajos), la zona en estudio, será correlacionado como zonas de alta o baja atenuación sísmica.

Asimismo, la ley de escalamiento de espectro sísmico (patrón de esfuerzo constante), obtenido a partir de la estimación de los parámetros de fuente (radio de fractura, caída de esfuerzo, momento sísmico), permite inferir el origen; en general, los sismos deberían exhibir un patrón de caída de esfuerzo constante y disminución de la frecuencia esquina con respecto al momento sísmico (Scherbaum y Kisslinger, 1984; Abercrombie y Leary, 1993; Abercrombie, 1995; Yamada et al., 2007; Kwiatek et al., 2014); sin embargo, para sismos locales y/o inducidos que ocurren en zonas volcánicas y geotérmicas, con magnitudes menores a 3 grados, difieren con respecto a los resultados convencionales y, por lo general, presentan caídas de esfuerzo más bajas que los sismos tectónicos y, en otros casos, no siguen el patrón de caída de esfuerzo constante (Del Pezzo et al., 2002; Richardson y Jordan, 2002; Tomic et al., 2009; Kwiatek et al., 2010; Mukuhira et al., 2013).

Por otro lado, el *valor b*, permite cuantificar la distribución relativa del tamaño de los sismos y el estado de esfuerzo de la zona de estudio (Wiemer y Wyss, 2002). *Valores b* próximos a 1.0 ( $b \sim 1$ ) están asociados a procesos tectónicos e indica zonas de corteza homogénea y alto esfuerzo aplicado; sin embargo, en ambientes volcánicos y geotérmicos estos valores son mayores a 1 o cercanos a 2 ( $b \sim 2$ ) e inclusive pueden sobrepasar los 2.5 ( $b > 2.5$ ). Estos *valores b altos o anómalos* han sido atribuidos a la heterogeneidad del medio, disminución del estado de esfuerzo efectivo, alto grado de fracturamiento, permeabilidad del yacimiento, procesos de inyección de agua en el yacimiento geotérmico y ocurrencia de enjambres sísmicos (Mogi, 1963; Wyss, 1973; Pearson, 1981; Del Pezzo et al., 2004; Maxwell et al., 2009; Viegas y Hutchings, 2011; Bachman et al., 2012; Viegas y Hutching, 2011; Kundu et al., 2012; Legrand et al., 2014).

En el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) inició los estudios sísmicos en 1993. Estudios realizados por Macías (1997), Romo-Jones et al. (2000), Wong et al. (2001), Wong y Munguía (2006), Lermo et al. (2010, 2011) y Sumy et al. (2013) mostraron que el CVGTV es altamente sísmico, generalmente, con profundidades hipocentrales menores a 11.0 km y magnitudes de coda pequeñas entre 1.0 y 3.0 Mc. La recopilación de los parámetros hipocentrales obtenidos del catálogo del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2016) y publicados en su página web para el periodo 2006-2013, corroboran los resultados previos, pues el mayor número de sismos con magnitudes mayores a 3.0 grados se localizan en el Golfo de California (Figura 3.1a) y mínimamente en el CVGTV (Figura 3.1b). Además observaron que la sismicidad se presentaba en forma de enjambres. Aunque mencionan que su origen estaría estrechamente correlacionada con la tectónica, éstos no fueron claramente establecidos. Por ello, en este estudio, se presenta el análisis detallado de la actividad sísmica del CVGTV, correspondiente al periodo 2003-2013, e involucra:



**Figura 3.1.** a). Sismicidad regional de la Península de Baja California obtenida del catálogo del Servicio Sismológico Nacional (SSN) entre los años 2006 y 2013. b) Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), principales sistemas de fallas y sismicidad con magnitudes mayores a 3.0.

- La localización hipocentral de los sismos y su distribución espacial y en profundidad.
- Identificación de enjambres sísmicos y su posible origen. Entendiéndose que los enjambres sísmicos ocurren en áreas determinadas y tiempos cercanos (hasta 2 meses).
- La correlación con los procesos de inyección de agua en el pozo LV8, pruebas de inyección, estimulación ácida y limpieza en el pozo LV6.
- La obtención de mecanismos focales, inversión del tensor de esfuerzo y la correlación con la tectónica regional y local.
- La estimación de  $Q_c$  a partir de la atenuación de las ondas de coda
- La estimación de los parámetros de fuente y
- La pseudo tomografía del *valor b*

Para este análisis se consideró, también, la ocurrencia de dos sismos de magnitud mayor (6.0 y 6.8 M), registrados el 12 de abril de 2012 y localizados a 111 y 109 km al NE de Guerrero Negro y ~170 km al NO del CVGTV, a fin de identificar su implicancia o no con la ocurrencia de enjambres dentro de este campo geotérmico.

## 3.2 SISMICIDAD DEL CVGTV

### 3.2.1 Datos sísmicos

Los datos sísmicos provienen de las redes sísmicas permanentes (RSP) y temporales (RST) instaladas en el CVGTV entre 2003 y 2013. En la [Tabla 3.1](#), se indica las coordenadas geográficas de estas estaciones sísmicas, el tipo de sensor y los años de operatividad de cada una de ellas y, en la [Figura 3.2](#), su distribución en el campo geotérmico. Desde el 2003 y hasta 2006, estas estaciones estuvieron compuestas por acelerómetros y sismógrafos de banda ancha donde los sismos fueron registrados por disparo. Sin embargo, entre el 2009 y 2010 las estaciones sísmicas fueron reemplazadas completamente por sismómetros de banda ancha de la marca Guralp CMG-6TD y con registros en continuo. Desde esa fecha hasta el 2013, vienen operando entre 8 y 10 estaciones sísmicas, 2 de ellas (TV21 y TV24) instaladas en junio de 2012, al sur y suroeste de la falla La Virgen y el volcán del mismo nombre. Obsérvese que entre los años 2007 y 2008 las estaciones sísmicas estuvieron inoperativas.

Si bien se contó con un buen número de estaciones (al menos entre los años 2009-2013), a pesar de los esfuerzos en el mantenimiento de las estaciones, fue inevitable observar algunos problemas técnicos (retrasos en el tiempo); sin embargo, éstos ocurrieron durante periodos cortos de tiempo y subsanados en las respectivas visitas de campo realizadas al CVGTV.

Entre los años 2003-2013, más de 2000 sismos fueron registrados en 3 a más estaciones sísmicas, los cuales fueron localizados y analizados, preliminarmente, por [Lermo et al. \(2004, 2006, 2009, 2010 y 2011\)](#). Obviamente, el número sobrepasa largamente si se contabilizan sólo

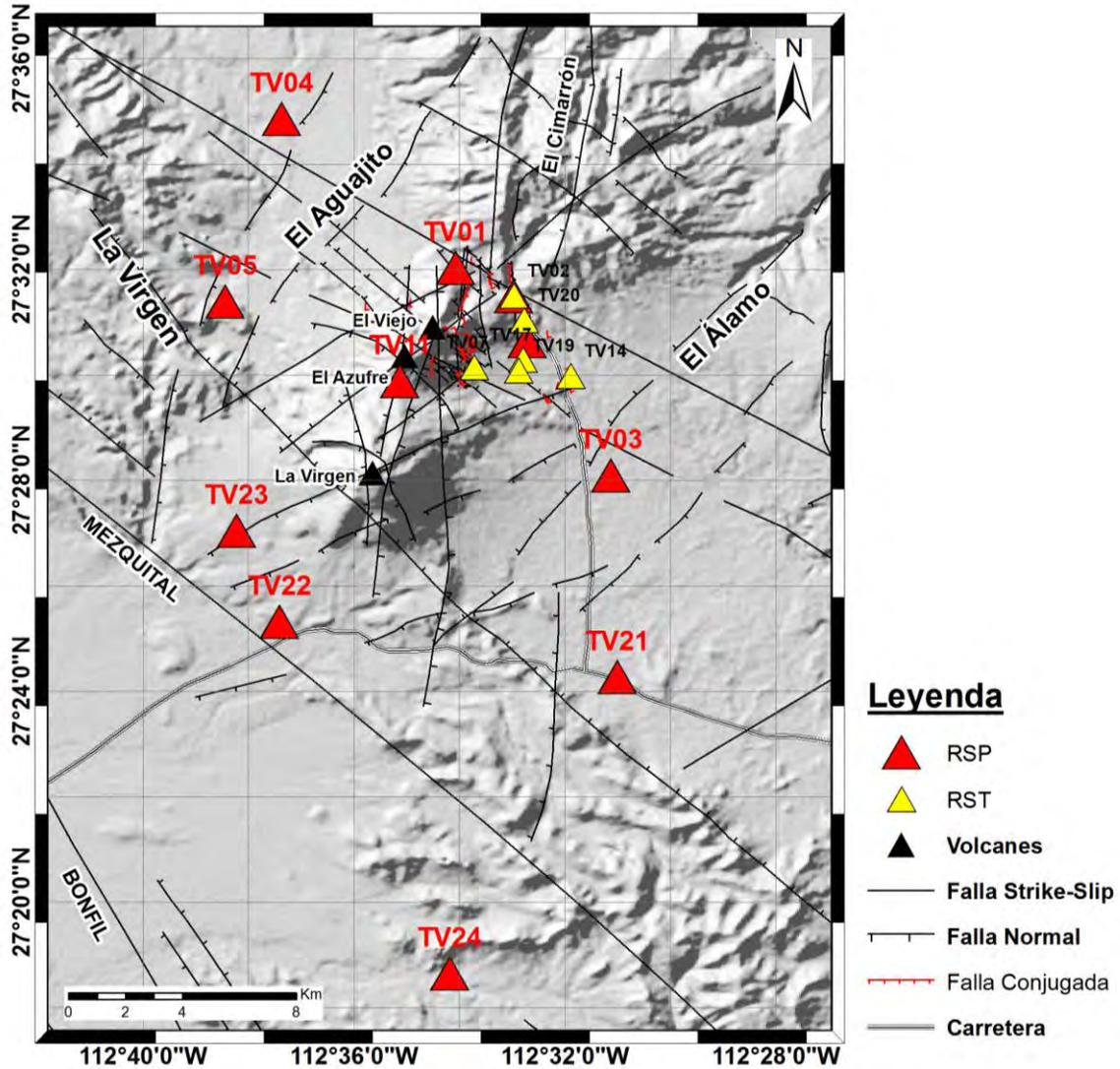
los sismos registrados en 1 y 2 estaciones. Sin embargo, para los fines de este estudio se seleccionaron 575 sismos registrados en 4 a más estaciones a fin de garantizar una buena localización hipocentral y estimar otros parámetros sismológicos que permitirán conocer el origen de dicha sismicidad y su correlación con la geología, la tectónica y los diferentes procesos de explotación del vapor geotérmico.

**Tabla 3.1.** Ubicación geográfica de las estaciones sísmicas instaladas en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes, entre los años 2003 y 2013. Lat. y Lon. = latitud y longitud en grados decimales; Alt.= altitud en metros sobre el nivel de mar; AC= acelerógrafo; BB = sismógrafo de banda ancha; SN= sin nombre.

Estación sísmica (Código)	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (msnm)	2003	2004	2006	2009	2010	2011	2012	2013	Nombre de ubicación
TV01	27.534	-112.568	710	AC	AC	AC	BB	BB	BB	BB	BB	Residencia
TV02	27.525	-112.549	695	AC			AC					SN
TV03	27.468	-112.519	600	AC		AC	AC	BB	BB	BB	BB	Kilómetro 8
TV04	27.581	-112.623	360				BB	BB	BB	BB	BB	La Cueva
TV05	27.523	-112.641	400	AC	AC	AC	BB	BB	BB	BB	BB	San Jorge
TV06	27.541	-112.618	310				BB	BB				San Alberto
TV07	27.502	-112.562	765	AC	AC	AC						SN
TV11	27.498	-112.585	968	AC	AC	AC	BB	BB	BB	BB	BB	El Azufre
TV12	27.518	-112.617	690	AC	AC	AC						SN
TV13	27.506	-112.540	615	AC	AC							SN
TV14	27.500	-112.531	578	AC	AC							SN
TV15	27.510	-112.562	970	AC	AC	AC						LV3
TV17	27.505	-112.547	626	AC	AC							SN
TV18	27.511	-112.545	600	BB	BB	AC	BB	BB	BB	BB	BB	El Cardón
TV19	27.501	-112.548	629	AC	AC							LV13, LV4
TV20	27.517	-112.546	715	BB	BB	BB						LV8
TV21	27.405	-112.517	366							BB	BB	Rancho La Virgen
TV22	27.422	-112.623	403					BB	BB	BB	BB	El Mezquite
TV23	27.451	-112.637	525						BB	BB	BB	La Jojoba
TV24	27.311	-112.570	379							BB	BB	Rancho Santa Lucía

### 3.2.2 Localización hipocentral

El programa de localización utilizado es el Hypocenter (Lienert y Havskov, 1995) y combina las características de los algoritmos Hypo71 (Lee y Lahr, 1975) y Hypoinverse (Klein, 1985). Este programa viene inserto dentro del paquete de programas de SEISAN versión 10.3 (Otemöller et al., 2015). Este programa similar a otros, utiliza como datos de entrada las coordenadas de las estaciones sísmicas, la lectura de los tiempos de arribo de las ondas sísmicas P y S, la duración del sismo, una relación de velocidad  $V_p/V_s$ , un modelo de velocidad de capas planas y una ecuación para el cálculo de la magnitud del sismo.



**Figura 3.2.** Localización de las estaciones sísmicas instaladas en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Virgenes. Los triángulos en color rojo corresponden a las estaciones de la Red Sísmica Permanente (RSP) y los triángulos en color amarillo a la Red Sísmica Temporal (RST).

Para obtener una buena localización hipocentral de los sismos registrados en el CVGTV, se seleccionaron, únicamente, los sismos registrados en 4 y más estaciones sísmicas, con errores en la lectura de los tiempos de arribo de ondas P y S de 0.02 y 0.04 s respectivamente. Además, se restringió el error máximo de localización en 2.0 km y el error cuadrático medio (rms) en 0.1 s. Se consideró una relación de velocidad  $V_p/V_s=1.70$  obtenido a partir de la curva de Wadati (Wadati, 1933). También se usó el modelo de velocidad (Tabla 3.2) modificado de Rodríguez (2000) y la ecuación de la magnitud de coda de Havskov y Macías (1983)

$$M_c = -1.59 + 2.4 \log_{10}(T) + 0.00046D \quad (3.1)$$

donde:  $M_c$  es la magnitud de coda en grados;  $T$  es la duración total del sismo en segundos y  $D$  la distancia epicentral en km.

$V_p$ (km/s)	Prof. (km)
1.24	0.00
2.31	0.25
3.00	0.50
4.50	1.52
6.30	7.00
7.60	11.00
8.20	25.00

**Tabla 3.2.** Modelo de velocidad (modificado de Rodríguez, 2000) utilizado en el procesamiento de datos sísmicos, periodo 2003-2013.  $V_p$ = velocidad de la onda P en kilómetros por segundo (km/s); prof.= profundidad en kilómetros (km).

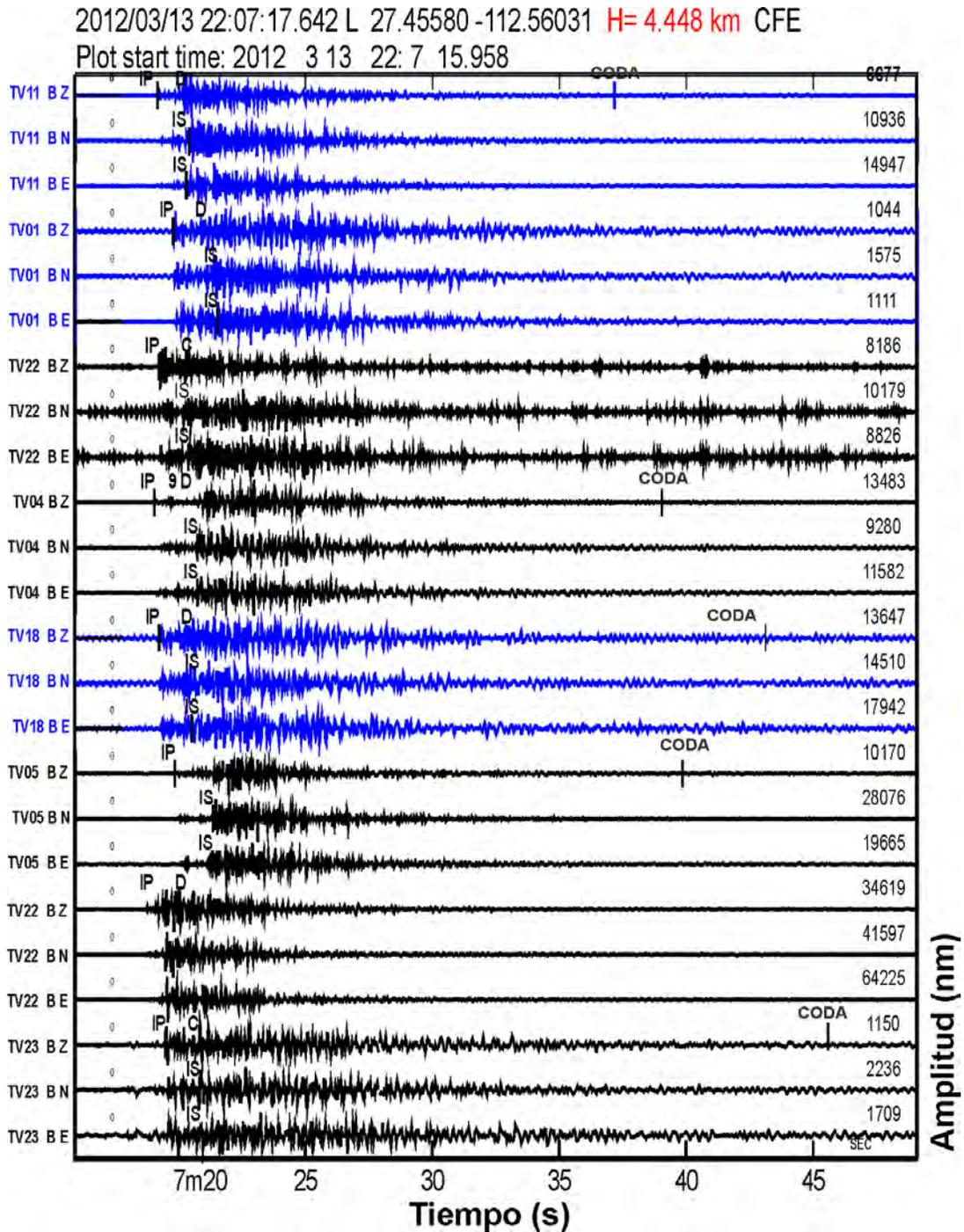
En la [Figura 3.3](#) se presenta un ejemplo de uno de los sismos seleccionados para la localización hipocentral. Obsérvese que las señales sísmicas típicas registradas por 8 estaciones de la RSP del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, muestran arribos de las ondas P, S y la coda del sismo, claramente identificables ([sismo N° 328; Anexo 1](#)).

Durante el periodo 2003-2013, se localizaron 575 sismos. Los resultados numéricos presentados en el [Anexo 1](#), muestran parámetros hipocentrales con errores menores e iguales a 2.0 km (latitud, longitud, profundidad focal) y la raíz cuadrático medio (rms) menor a 0.08. Las magnitudes de coda ( $M_c$ ) fueron estimadas entre 0.4 y 2.9 grados y las profundidades focales son menores a 11.0 km.

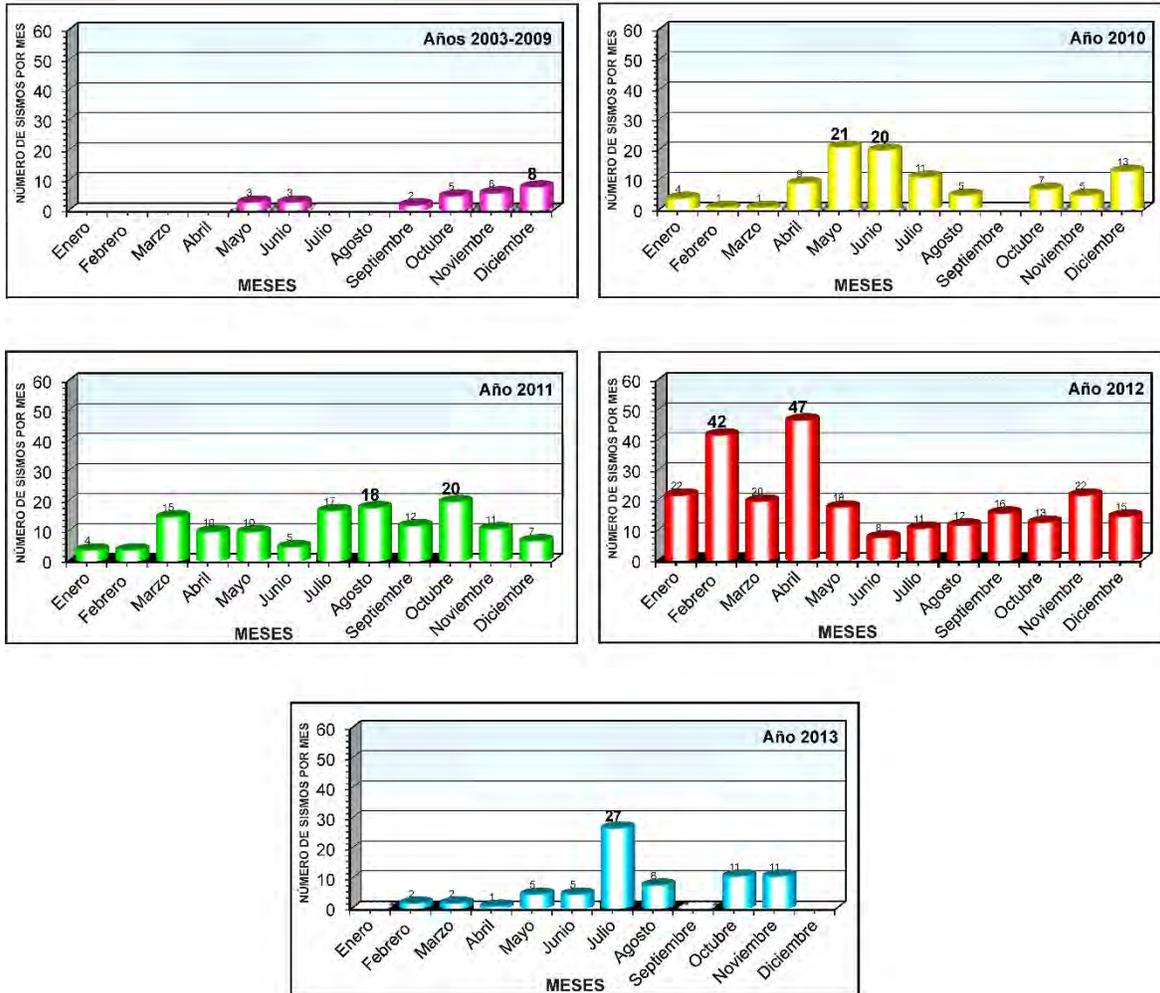
Del total de 575 sismos localizados, 27 corresponden a los años 2003-2009, 97 al año 2010, 133 al año 2011, 246 al año 2012 y 72 al año 2013 ([Figura 3.4](#)). Como es evidente, el número reducido de sismos para el periodo 2003-2009 podrían deberse a los tipos de estaciones sísmicas operativas entre los años 2003 y 2006 (acelerómetros), al modo de registro utilizado en ese tiempo (disparo) y a la consideración impuesta, en este estudio, para su localización hipocentral (4 a más estaciones). Entre los años 2010 y 2012, el número de sismos incrementó considerablemente. El año 2013 no fue la excepción, aunque no se ve reflejada en el número de sismos localizados, pues debido a problemas técnicos, el mayor número de sismos fueron registrados en 2 y 3 estaciones.

Analizando la ocurrencia de los sismos por meses mostrada, también, en la [Figura 3.4](#) se observa que, en diciembre de 2009, mayo de 2010, octubre de 2011, abril de 2012 y julio de 2013, se registraron el mayor número de sismos, con un máximo de 47 en abril de 2012. Estos incrementos de los sismos en determinados meses, están correlacionados a la ocurrencia de enjambres sísmicos, considerándose en este estudio, la definición general de los enjambres; es decir, que ocurrieron en zonas determinadas y en tiempos cercanos (hasta 2 meses); además presentaron formas de onda, frecuencias predominantes y espectrogramas muy similares. La

identificación numérica de los enjambres sísmicos, son mostrados en el Anexo 1 donde, además, aparecen los parámetros hipocentrales de los mismos.



**Figura 3.3.** Señales sísmicas típicas registradas por 8 estaciones de la RSP instaladas en el CVGTV (ver Figura 3.2). En color azul se resaltaron las estaciones TV01, TV11 y TV18 instaladas en la zona central (Zona A). La amplitud de las ondas P y S está representada en nanómetros (nm) y el tiempo en segundos. IP e IS =arribo impulsivo de las ondas P y S; C y D= polaridad compresiva y dilatacional de la onda P; H= hipocentro en kilómetros.



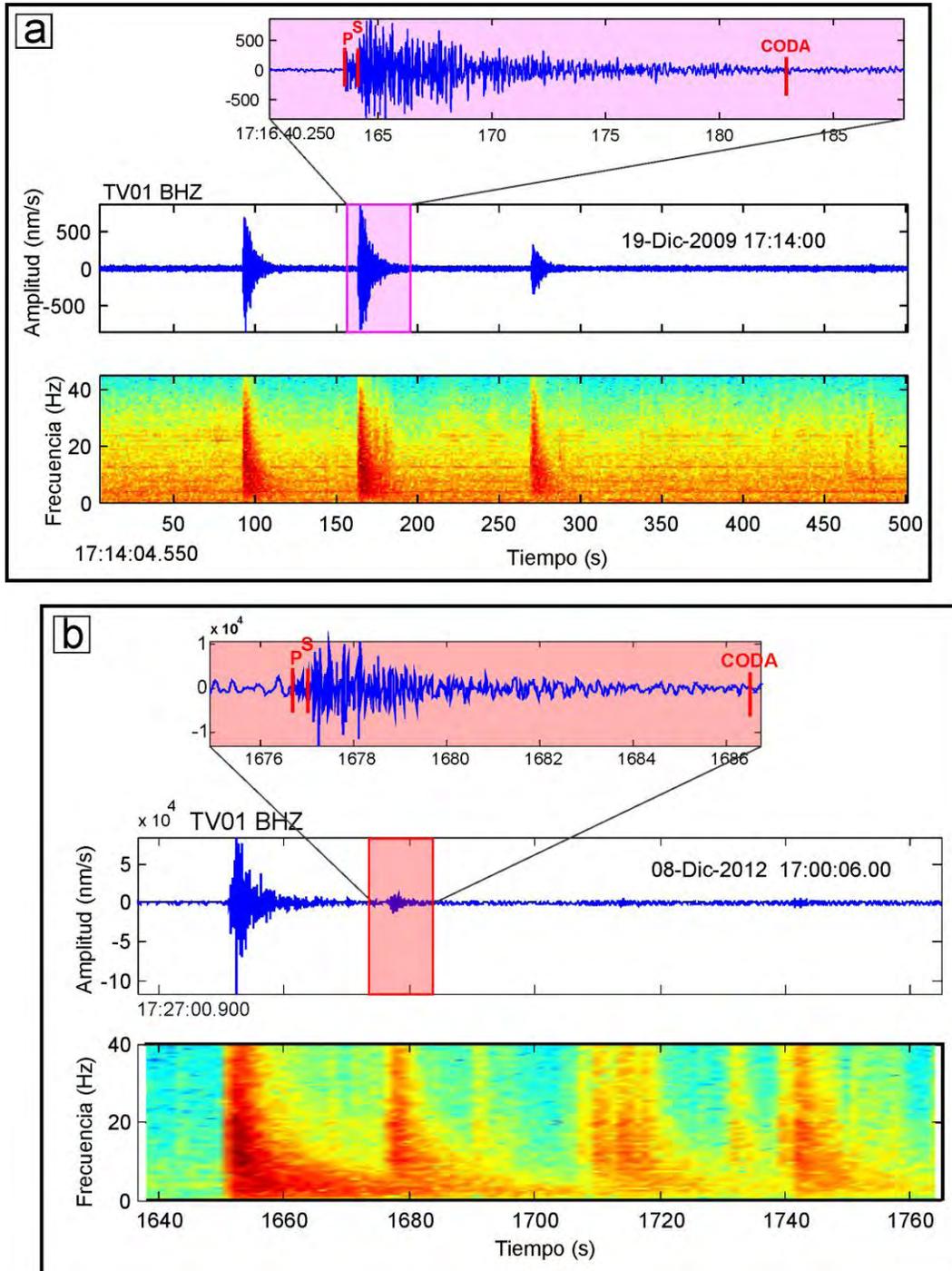
**Figura 3.4.** Representación gráfica del número de sismos localizados por años y meses. El mayor número de sismos (47) fue registrado en abril de 2012.

La [Figura 3.5](#) muestra el registro de 2 enjambres sísmicos (N° Enj. 1 y 2; Anexo 1) identificados en diciembre de 2009 ([Figura 3.5a](#)) y diciembre de 2012 ([Figura 3.5b](#)). Obsérvese el consecutivo registro de sismos con formas de onda y espectrogramas muy similares, además de altas frecuencias de hasta 40 Hz.

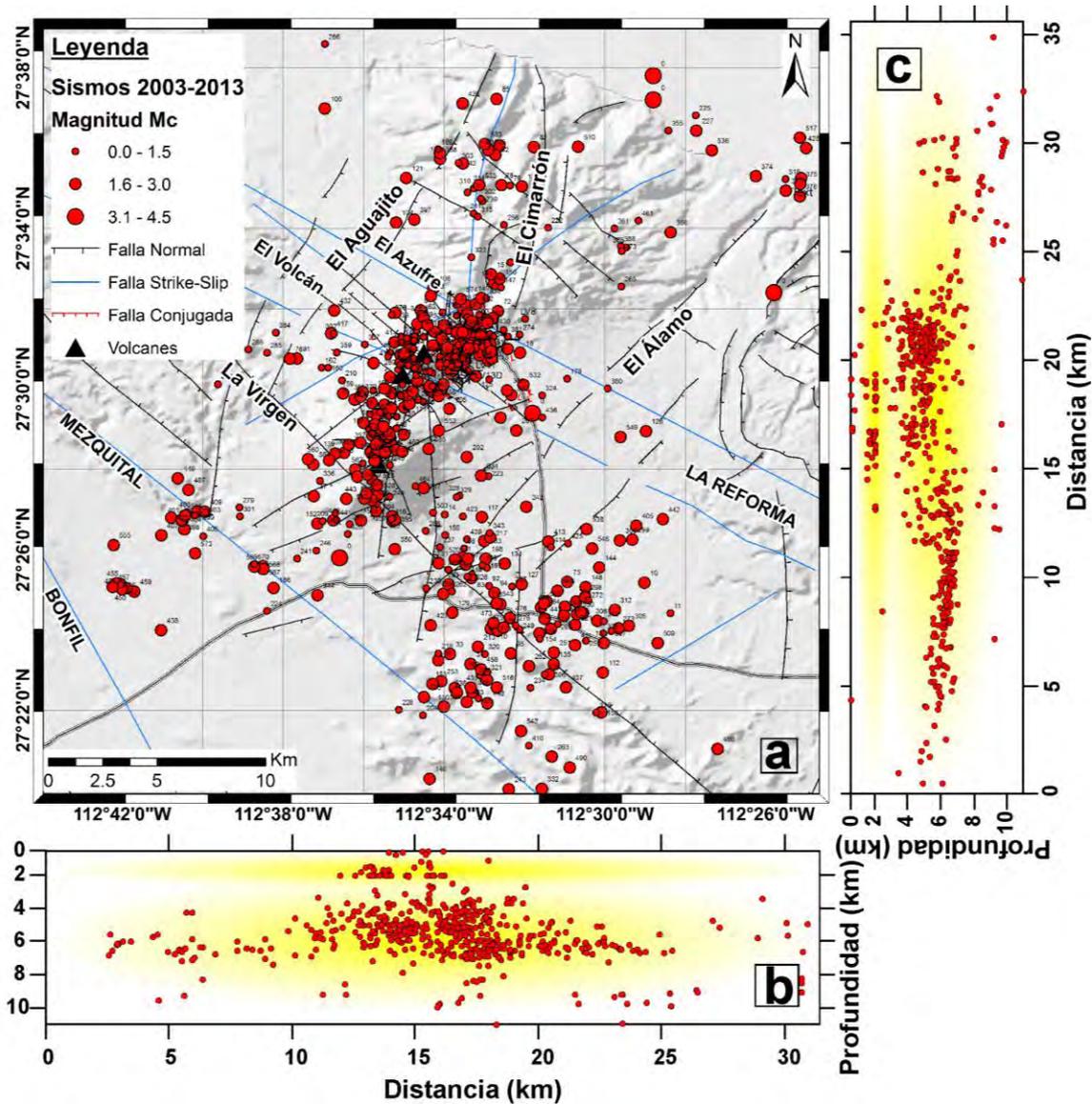
### 3.2.3 Distribución de la sismicidad

En la [Figura 3.6a](#) se presenta la distribución espacial de los 575 sismos y en las [Figuras 3.6b y 3.6c](#) su distribución en profundidad. En la [Figura 3.6a](#) se observa que la sismicidad se concentra a lo largo del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes compuesta por los volcanes La Virgen, el Azufre y el Viejo, emplazados en dirección NE-SO, donde además se localiza el campo geotérmico; mientras que en la caldera El Aguajito (AG), hacia el sur y oeste del volcán La Virgen, la sismicidad es menor y más dispersa. Su distribución general en profundidad, en direcciones O-E ([Figura 3.6b](#)) y N-S ([Figura 3.6c](#)), permiten evidenciar que la sismicidad se

distribuye en 2 rangos de profundidad; la primera entre 0.5 y 2.5 km y la segunda entre 3.5 y 11 km.



**Figura 3.5.** Enjambres sísmicos registrados en la estación TV01 de la RSP instalada en el CVGTV. a) Enjambre 1 de diciembre de 2009. b) Enjambre 2 de diciembre de 2012 (Anexo 1). Obsérvese la similitud de las formas de onda y espectrogramas. BHZ = estación sísmica de banda ancha, componente vertical (Z); Hz= Hertz.

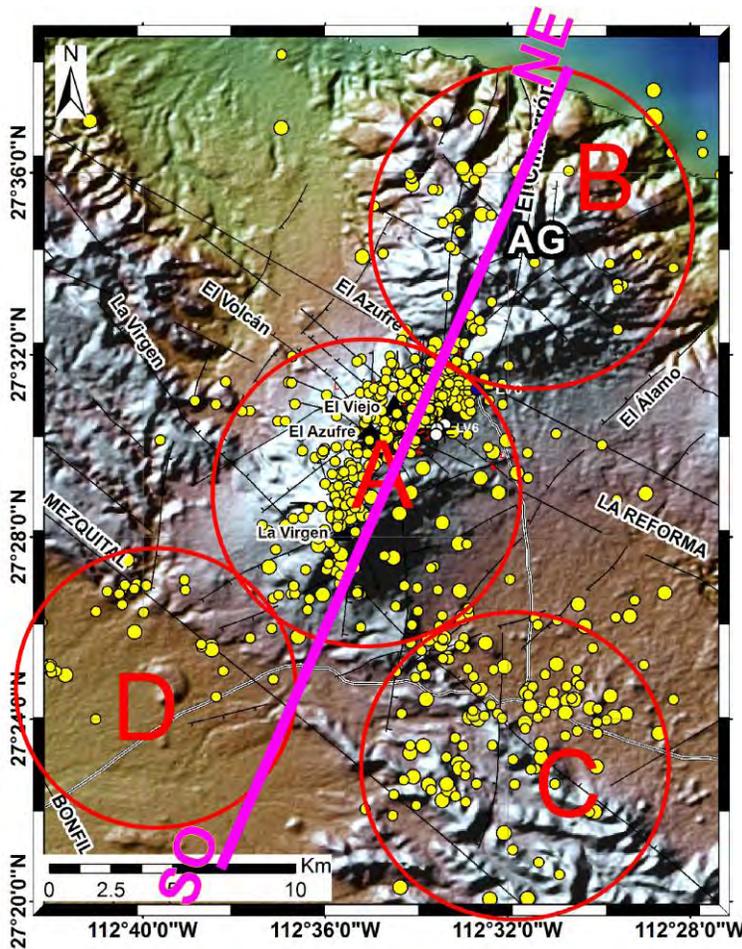


**Figura 3.6.** Distribución de la sismicidad registrada en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes, correspondiente al periodo 2003-2013. a) Distribución espacial; b) y c) Hipocentros de los sismos proyectados en direcciones oeste-este (O-E) y sur-norte (S-N) respectivamente. Las elipses de color amarillo y rojo representan a los sismos con profundidades superficiales (entre 0.5 y 2.5 km) y profundos (entre 3.5 y 11 km).

También se observa que los sismos superficiales se concentran, solamente, por debajo del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (Figura 3.6b), mientras que los sismos más profundos ocurren a los extremos del complejo volcánico; es decir, hacia la caldera El Aguajito, el Golfo de California y las zonas sur y oeste del volcán La Virgen, donde alcanzan profundidades del orden de 11 y 8 km respectivamente. A diferencia de ellos, los concentrados por debajo del complejo volcánico, presentan profundidades menores a 6.5 km (Figura 3.6c).

Para una mejor comprensión de su evolución en el tiempo, así como su distribución espacial y en profundidad se realiza la descripción año por año, aunque se exceptúa los años 2003-2010, pues debido al reducido número de sismos, se consideró en un solo periodo. Además de su descripción por años, también se enfatiza su ubicación espacial dentro de zonas específicas; por ello, el CVGTV fue delimitado en 4 zonas: A, B, C y D (Figura 3.7). Así:

- 1) La **Zona A** corresponde a la parte central donde se ubican el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes, los diferentes sistemas de fallas (regionales, locales, conjugadas) y los pozos productores e inyectoras (campo geotérmico).
- 2) La **Zona B** corresponde a la caldera el Aguajito y el sistema de fallas El Cimarrón;
- 3) La **Zona C** corresponde al sur del volcán La Virgen y la continuación del sistema de fallas del mismo nombre y,
- 4) La **Zona D** abarca el extremo oeste del volcán La Virgen delimitado por los sistemas de fallas Mezquital y Bonfil. Además, considerando la importancia de la distribución temporal de los sismos en profundidad, se seleccionó la dirección del perfil stratigráfico SO-NE del estudio realizado por Benton et al. (2011) (ver Figura 2.4).



**Figura 3.7.** Ubicación de las 4 zonas sísmicas (A, B, C y D) y dirección preferencial del perfil SO-NE para la distribución de los sismos en profundidad. Los círculos en color amarillo son los sismos registrados en el periodo 2003-2013. AG = Caldera Aguajito.

### 3.2.4 Distribución de la sismicidad por años

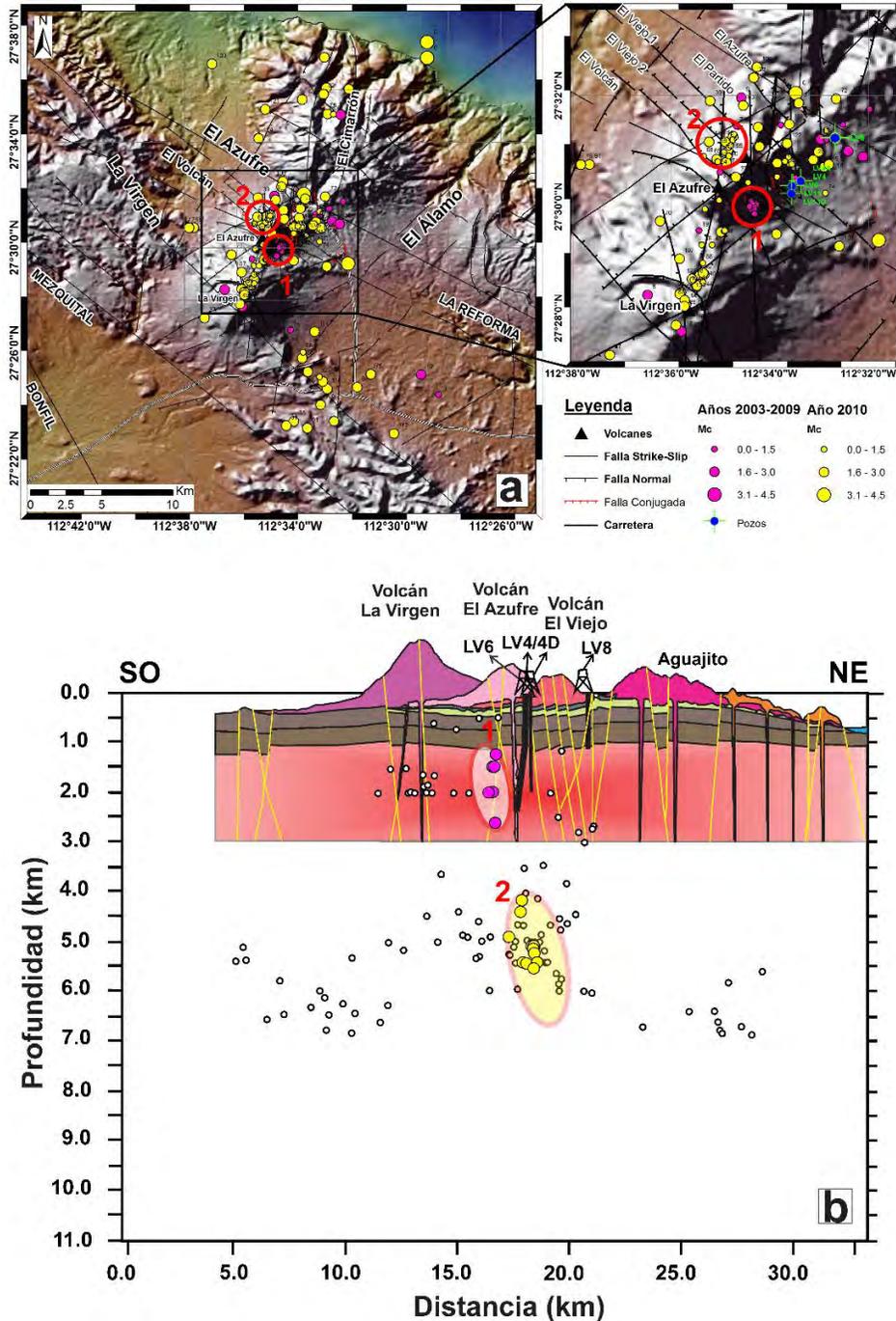
Entre los **años 2003 y 2010** se localizaron 124 sismos. Esta sismicidad se distribuye espacialmente ([Figura 3.8a](#)) en la parte central del campo geotérmico (Zona A), en la caldera El Aguajito (Zona B) y en menor número al sur del volcán La Virgen, entre los sistemas de fallas La Virgen y Mezquital (Zona C). Durante este periodo se identificaron dos enjambres de sismos (1 y 2). **El enjambre 1**, se registró en diciembre de 2009 y se concentra en la parte sur del volcán el Azufre, a 3 km de los pozos productores LV4/4A, LV6, LV11/11D. Mientras tanto el **enjambre 2**, fue registrado entre abril y mayo de 2010 y se concentra en la parte norte del enjambre 1 y del volcán El Azufre. Su distribución en profundidad ([Figura 3.8b](#)), representado en el perfil estratigráfico de [Benton et al. \(2011\)](#) ([Figuras 2.4 y 3.7](#)), muestra que la sismicidad ocurre hasta 6.5 km de profundidad. Obsérvese también que el enjambre 1 presenta profundidades superficiales entre 1.5 y 2.5 km, mientras que los sismos del enjambre 2 son más profundos (entre 3.5 y 6.5 km). Ambos enjambres siguen una tendencia elongada y se localizan al NO y O de los pozos LV6 y LV4/4D.

En el **año 2011** se localizaron 133 sismos. Esta sismicidad ([Figura 3.9a](#)), muestra una distribución más dispersa con respecto a los años anteriores (2003-2010), con un relativo incremento hacia la caldera el Aguajito (Zona B) y los extremos sur y oeste del volcán la Virgen (Zona A). Durante este año, se identificaron dos enjambres de sismos (3 y 4) y fueron registrados en los meses de mayo (**enjambre 3**) y junio (**enjambre 4**). Ambos enjambres se ubican en la zona central del campo geotérmico o Zona A, entre los volcanes La Virgen y El Azufre (3) y, entre el volcán El Viejo y el sistema de fallas El Azufre (4). En profundidad ([Figura 3.9b](#)), estos sismos ocurren entre 2.5 y 7.5 km. Algunos sismos más profundos (hasta 10 km), se presentan por debajo de la caldera El Aguajito. En cuanto a los enjambres, éstos ocurren entre 2.5 y 7.5 km, con una tendencia elongada y dispersa, por debajo de los pozos productores LV4/4A, LV6, LV11/11D y el pozo inyector LV8.

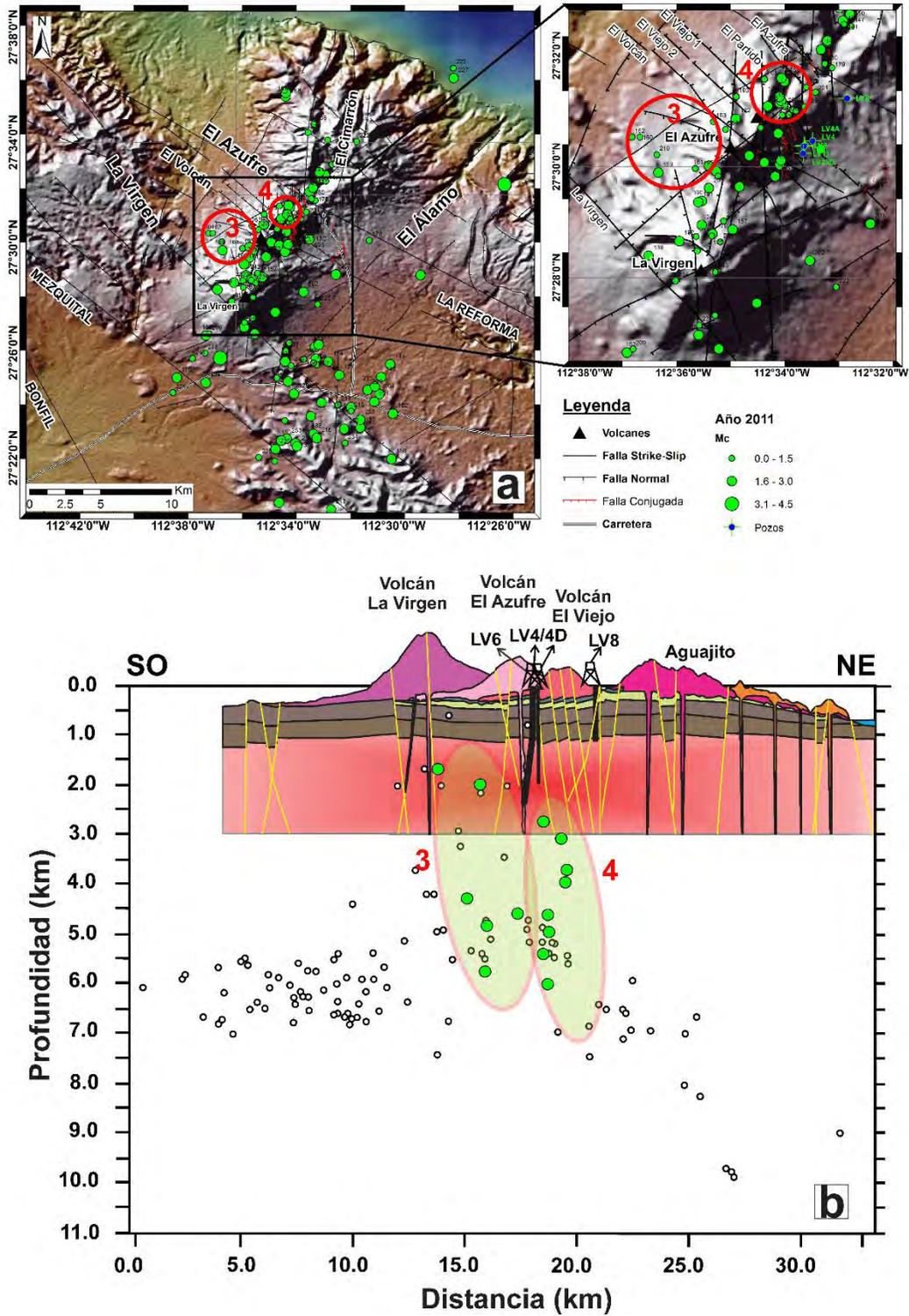
En el **año 2012**, la sismicidad se incrementó considerablemente. Se localizaron hasta 246 sismos en total. Su distribución espacial mostrada en la [Figura 3.10a](#), sigue una tendencia similar a los años anteriores, aunque con incrementos importantes en los extremos sur (Zona C) y oeste (Zona D) del volcán La Virgen. Durante este año, se identificaron hasta seis enjambres de sismos (5, 6, 7, 8, 9 y 10), dos de ellos ubicados en la parte central del campo geotérmico (Zona A) y los cuatro restantes en las zonas B, C y D. Así, el **enjambre 5**, fue registrado en el mes de febrero y se localiza al SE del volcán La Virgen. Los **enjambres 6 y 7** ocurrieron en abril de 2012 y se distribuyen entre los volcanes La Virgen, El Azufre y la caldera Aguajito. Mientras tanto, los **enjambres 8 y 9** se registraron en los meses de junio y septiembre respectivamente.

A diferencia de los enjambres anteriores, éstos se distribuyen al oeste del volcán La Virgen, entre los sistemas de fallas Mezquital y Bonfil. Por último, el **enjambre 10** se registró en el mes de diciembre de 2012 y se ubica entre el volcán El Viejo y el sistema de fallas El Azufre, a 2.5 km del pozo inyector LV8. En profundidad ([Figura 3.10b](#)), estos enjambres ocurren entre

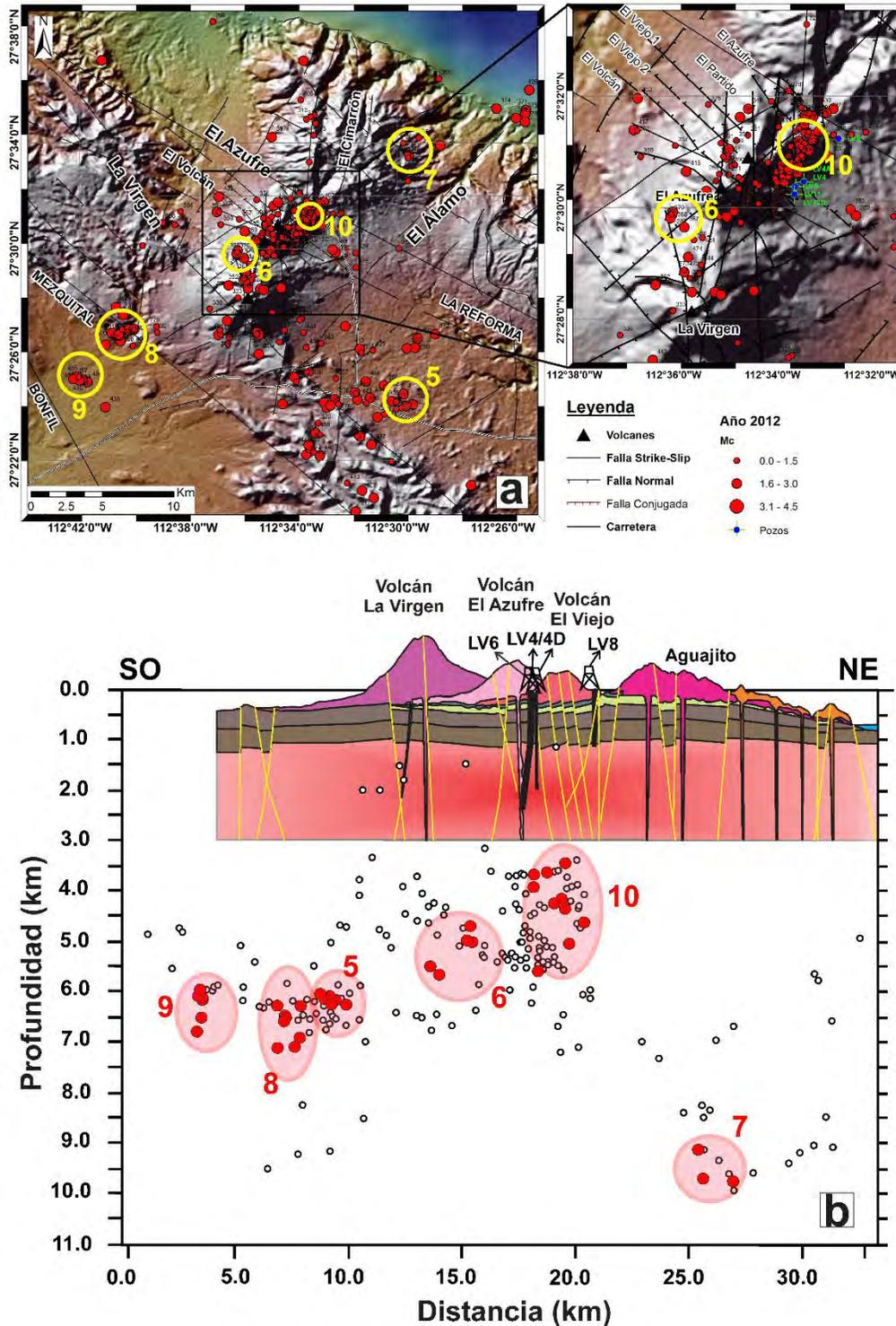
3.5 y 10 km, donde el más profundo (9 a 10 km) corresponde al **enjambre 7** y el superficial al **enjambre 10** (entre 3.5 y 6.0 km). Obsérvese que este último enjambre ocurre por debajo de la ubicación del pozo inyector LV8.



**Figura 3.8.** Distribución de los sismos entre los años 2003 y 2010. a) Distribución espacial y b) distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE. Los círculos, elipses y números hacen referencia a los enjambres sísmicos. Otros símbolos como en las Figuras 2.4 y 3.7.



**Figura 3.9.** Distribución de los sismos registrados en el año 2011. a) Distribución espacial y b) distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE. Otros símbolos como en las Figuras 3.7 y 3.8.



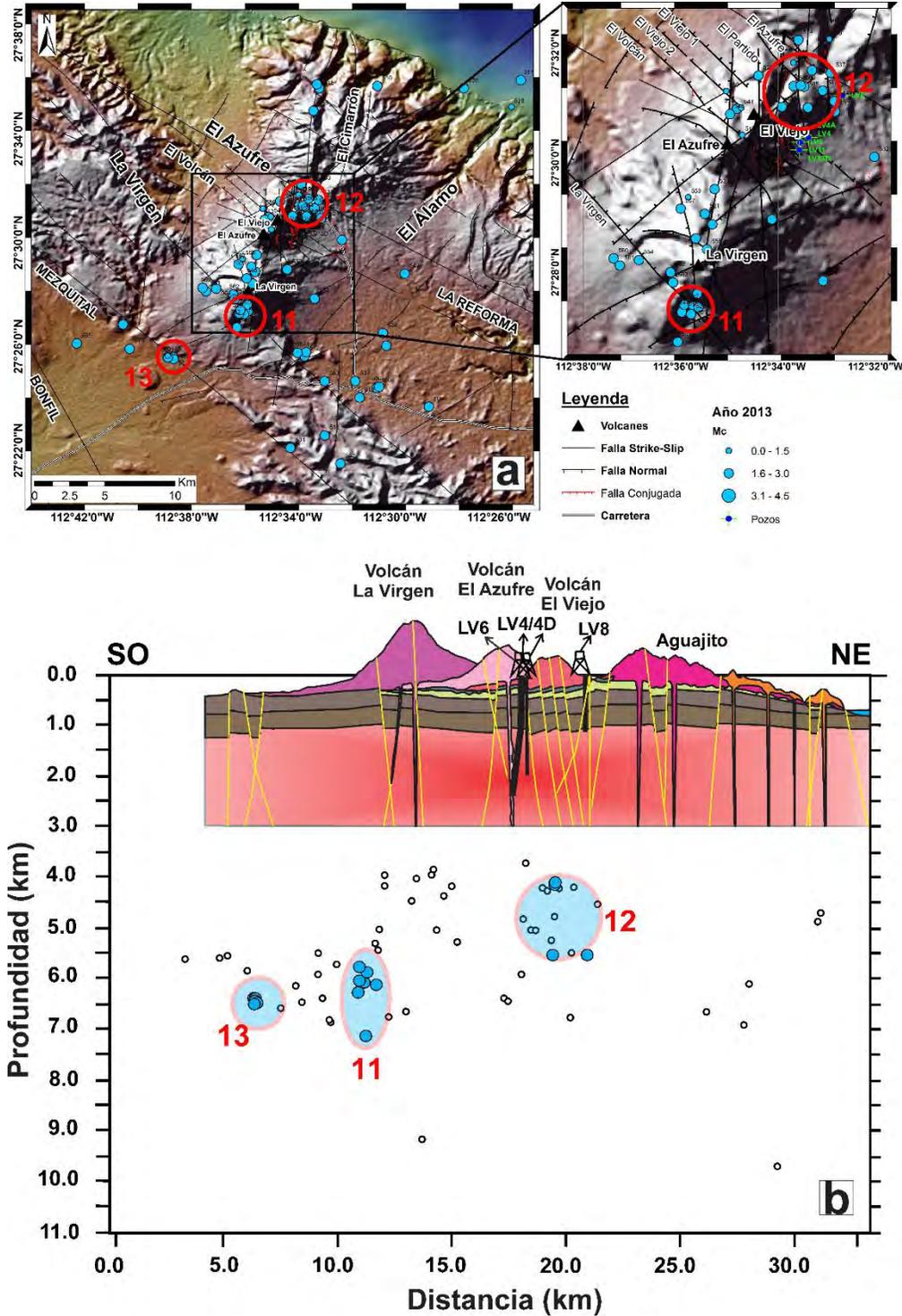
**Figura 3.10.** Distribución de los sismos y enjambres de sismos registrados en el año 2012. a) Distribución espacial y b) distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE. Otros símbolos como en las Figuras 3.7 y 3.8.

En el **año 2013**, se localizaron 72 sismos en total. Su distribución espacial mostrada en la [Figura 3.11a](#) sigue una tendencia similar a los años anteriores, aunque con incrementos importantes en los extremos suroeste del volcán La Virgen (Zona A). Durante este año se identificaron tres enjambres de sismos (11, 12 y 13). El **enjambre 11** se registró en julio de 2013 y corresponde, precisamente, a los sismos localizados al suroeste del cráter del volcán La Virgen, entre el sistema de fallas del mismo nombre y fallas menores con dirección N-S y SO-NE. Mientras tanto, el **enjambre 12**, registrado entre octubre y noviembre de 2013, se localiza a 2.8 km del pozo inyector LV8, entre los sistemas de fallas El Viejo 1, El Partido y el Azufre. Con respecto al **enjambre 13** registrado en noviembre de 2013, se localiza al sureste del volcán La Virgen y sobre la traza de la falla Mezquital. En profundidad ([Figura 3.11b](#)) se observa que éstos ocurren, principalmente, entre 4.0 y 7.1 km.

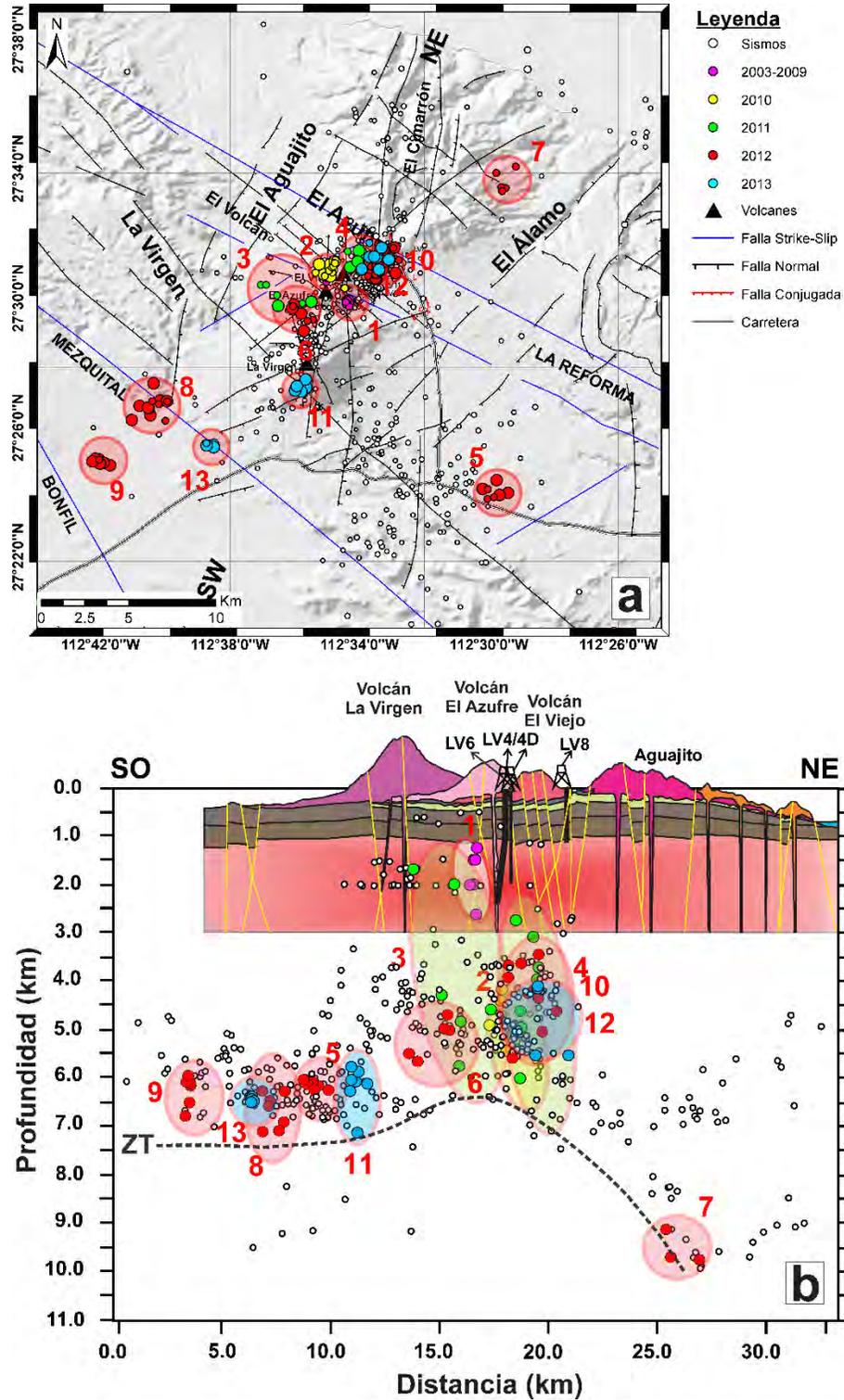
Similar a los años anteriores, los enjambres 11, 12 y 13 presentaron rangos de profundidades entre 5.6 y 7.1 km (enjambre 11), 4.0 y 5.2 km (enjambre 12) y 6.5 km (enjambre 13) respectivamente. Obsérvese que el enjambre 12, se ubica por debajo del pozo inyector LV8 y el **enjambre 13** muestra una clara agrupación y en una misma profundidad, por debajo de la traza del sistema de fallas Mezquital.

La [Figura 3.12a](#), resume la ocurrencia de hasta 13 enjambres sísmicos entre el 2003 y 2013; 7 de ellos ocurrieron en la zona central del CVGTV, donde se ubica el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV), se evidencia una intensa heterogeneidad tectónica y se realizan las operaciones propias de la explotación geotérmica; los otros 6 en los alrededores del CVGTV, hacia la caldera El Aguajito, sur del volcán La Virgen y entre los sistemas de fallas Bonfil y El Mezquital.

Por su distribución en profundidad ([Figura 3.12b](#)), los enjambres de la zona central se localizaron entre 3.0 y 6.5 km y las periféricas entre 8 y 11 km. Solamente los enjambres 1 (2009) y 7 (2010) ocurrieron a niveles más superficiales (1.5-2.5 km) y más profundos (9-10 km) con respecto al total de enjambres. Obsérvese que algunos enjambres presentan formas elipsoidales y elongadas, características similares a los descritos por [Mossop \(2001\)](#) y [Stark \(2003\)](#). Esta máxima profundidad de los sismos, entre 8 y 11 km en los alrededores del CVGTV y menor a 6.5 km en la zona central del campo geotérmico (Zona A), por debajo del CVTV, delimitaría la posible zona de transición reológica frágil-dúctil (ZT) ([Antayhua et al., 2015](#)) ([Figura 3.12b](#)).



**Figura 3.11.** Distribución de los sismos y enjambres de sismo registrados en el año 2013. a) Distribución espacial y b) distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE. Otros símbolos como en las Figuras 3.7 y 3.8.



**Figura 3.12.** a) Distribución de la sismicidad y los 13 enjambres identificados entre el 2003 y 2013. b) Distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE (ver Figura 3.7). Los círculos en colores y números hacen referencia a los enjambres sísmicos. ZT= posible zona de transición frágil-dúctil.

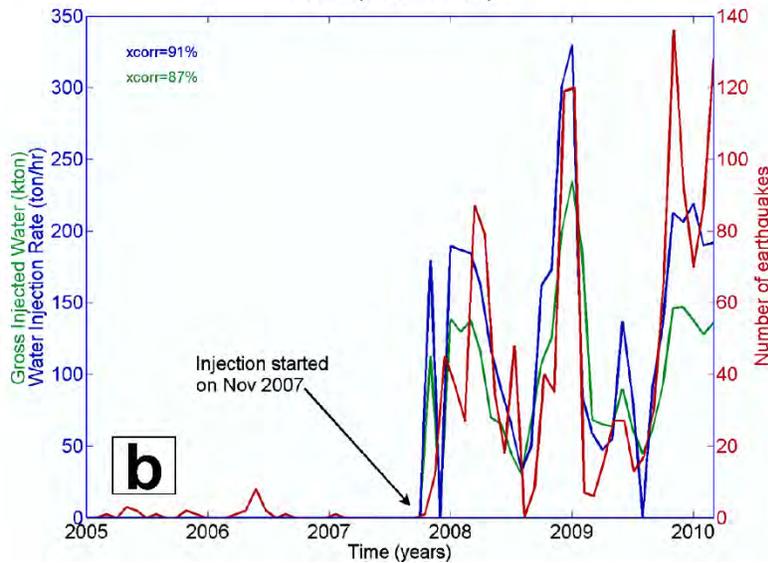
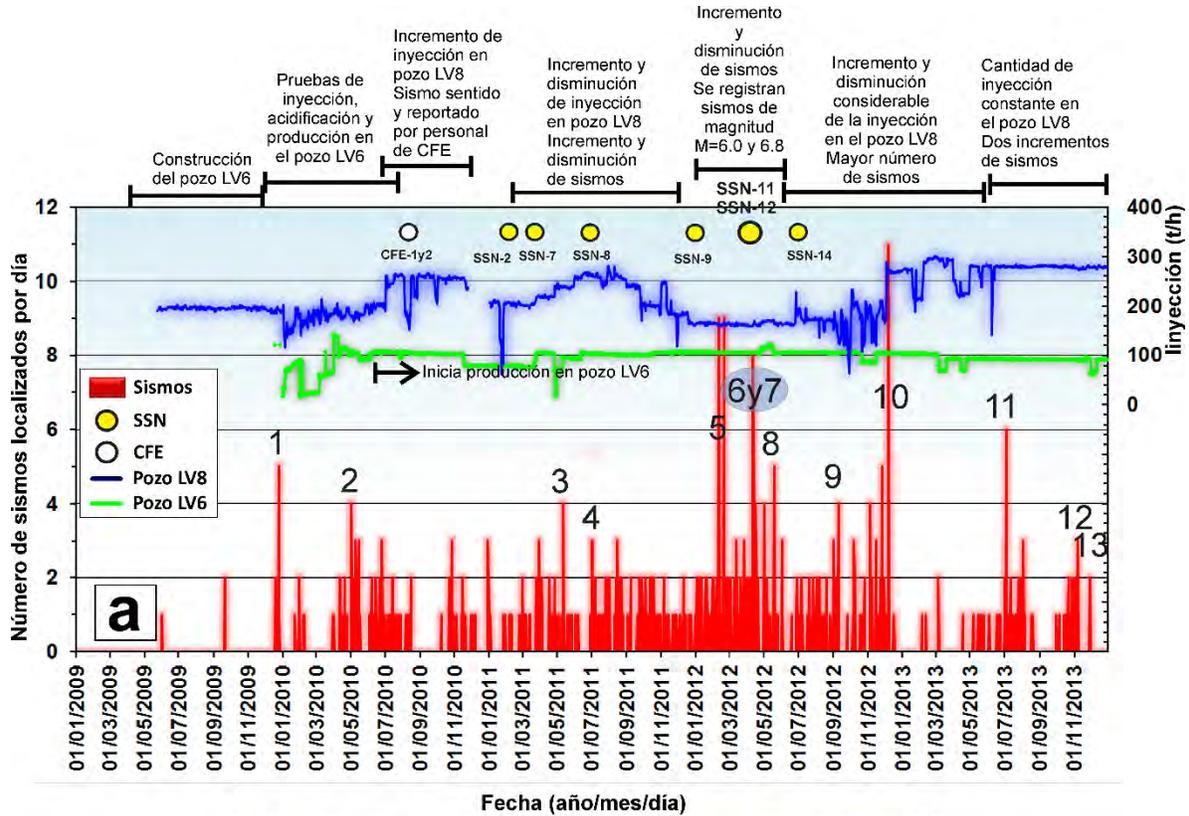
### 3.3 SISMICIDAD Y PROCESOS DE INYECCIÓN

A fin de establecer el origen de la sismicidad del CVGTV con profundidades menores a 11 km y de la ocurrencia de hasta 13 enjambres sísmicos, se analiza temporalmente, la cantidad de agua inyectada al reservorio geotérmico en el pozo LV8, el periodo de pruebas de inyección, estimulación ácida y limpieza realizada en el pozo LV6 (16 de diciembre 2009 - 9 de marzo 2010) con el número de sismos localizados. Los valores de ambos (cantidad o gasto de inyección y número de sismos) están expresados en toneladas por hora (t/h) y número de sismos localizados por día. Debido al periodo de disponibilidad continua de datos de ambos pozos, la correlación comprende el periodo 2009-2013, incluyendo, además, a los dos sismos de 6.0 y 6.8 M, localizados a 111 y 109 km al noreste de Guerrero Negro y 170 km al NO del CVGTV (SSN, 2016) (Figuras 3.1a y 3.1b) y al sismo localizado por personal de CFE (Soto et al., 2010).

La Figura 3.13a muestra la correlación de la inyección y las pruebas de inyección con el número de sismos localizados por día. En esta figura se observa, claramente, una estrecha correlación para los enjambres sísmicos 1, 2, 3, 4 y 10. Así,

Entre el 16 y 28 de diciembre de 2009 se realizaron pruebas de inyección, acidificación, lavado y pos-lavado en el pozo LV6, con gastos de 40, 80 y 120 t/h. En este mismo periodo, la actividad sísmica incrementó significativamente y se presentó el **enjambre sísmico 1**. De acuerdo a la distribución espacial (Figura 3.8a) y en profundidad (Figura 3.8b), estos sismos ocurrieron debajo del volcán el Azufre, entre 1.5 y 2.5 km de profundidad y con forma elongada hacia la dirección del pozo LV6, siguiendo la tendencia del sistema de fallas El Azufre, donde numerosas *fallas conjugadas* (FC) habían sido identificadas por Rocha y Romero (2009).

- 1) Entre abril y mayo de 2010, CFE efectuó diversas pruebas de operatividad del pozo LV6, entre ellos, inyección de agua y aire, pruebas de producción de vapor, previos a la producción continua y su integración al sistema de generación de energía eléctrica el 15 de mayo del mismo año. Estas pruebas fueron realizados con gastos entre 60.3 y 135.7 t/h (Figura 3.13). Después de estos cambios en los gastos (en las pruebas de operación del pozo LV6), en mayo de 2010, se registraron incrementos de sismicidad entre 3 y 5 eventos por día y se identificó el **enjambre sísmico 2**. Este enjambre se localizó a profundidades entre 3.5 y 6.5 km, siguiendo una tendencia elongada por debajo del volcán El Azufre y el pozo LV6 (Figura 3.8b).
- 2) En mayo y junio del 2011 los gastos de inyección en el pozo LV8 incrementaron desde 150 t/h hasta 280 t/h (Figura 3.13). Asimismo, durante estos meses se observaron incrementos de sismicidad de hasta 4 eventos por día, registrándose los **enjambres 3 (mayo) y 4 (junio)**. Ambos enjambres fueron localizados entre 1.5 y 7.5 km de profundidad, distribuidos de manera dispersa por debajo de los pozos LV6, LV8 y los volcanes El Azufre y El Viejo (Figura 3.9b).



**Figura 3.13.** a) Correlación temporal entre la cantidad de inyección en el pozo LV8 y pruebas de inyección en el pozo LV6 en toneladas por hora (t/h) y el número de sismos localizados por día. El periodo analizado corresponde a los años 2009 y 2013. Los círculos blancos y amarillos son los sismos localizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Servicio Sismológico Nacional (SSN). Los números del 1 al 13 representan a los enjambres identificados. b) Correlación temporal de la inyección y el número de sismos en el campo geotermal de Geysers, California (Viegas y Hutchings, 2011).

- 3) Otra estrecha correlación corresponde a diciembre de 2012. En este mes, la cantidad de inyección de agua en el pozo LV8 incrementó considerablemente desde 165 t/h hasta 289 t/h (Figura 3.13). A su vez, se evidenció un notable incremento en el número de sismos localizados por día (11 eventos), identificándose así el **enjambre 10**. Este enjambre se concentró entre la fallas El Partido y el sistema de fallas Reforma-El Azufre, por debajo del pozo LV8, a profundidades entre 3.5 y 6.0 km (Figura 3.10b).

En contraste a los anteriores, los enjambres 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12 y 13 no evidencian y/o no muestran una correlación con la cantidad de inyección. Así por ejemplo:

- 1) En febrero de 2012 se registró un nuevo incremento de sismos (7 eventos por día) y se identificó el **enjambre 5**. Este enjambre se localizó entre 6 y 6.5 km de profundidad y al SE del sistema de fallas La Virgen (Figuras 3.10a y 10b), pero la inyección de agua en el pozo LV8 no varió, manteniéndose en ~160 t/h tal como se observa en la Figura 3.13.
- 2) Mientras tanto, en abril de 2012 se registraron los **enjambres 6 y 7**. Estos enjambres están localizados en dos zonas diferentes entre los volcanes La Virgen, El Azufre (Zona A, enjambre 6), la caldera Aguajito (Zona B, enjambre 7) y a profundidades superficiales (4-4.5 km) y profundos (9-10 km) (Figuras 3.10a y 10b). Aun cuando estos enjambres ocurrieron en diferentes zonas y profundidades diferentes, ambos incrementaron en el número de sismos por día (8 eventos) después de la ocurrencia de los sismos de magnitud mayor del 12 de abril de 2012 ( $M = 6.0$  y  $6.8$ ), localizados a 111 y 109 km al NO de Guerrero Negro y 170 km al NO del CVGTV. Obsérvese en la Figura 3.13 que la cantidad de inyección se mantuvo casi constante entre 159 y 161 t/h.
- 3) En junio y septiembre de 2012 se registraron dos incrementos en el número de sismos (5 y 4 eventos), identificándose así los **enjambres 8 y 9**. Ambos enjambres se localizaron entre las fallas Bonfil y Mezquital, a profundidades entre 5.5 y 7.3 km (Figuras 3.10a y 10b). Como es evidente, no se observa una correlación con la cantidad de inyección del pozo LV8, particularmente en junio de 2012 donde la inyección se mantuvo en ~160 t/h. Aún cuando en septiembre se observaron disminuciones e incrementos de la inyección entre 119 y 187 t/h (Figura 3.13), estos no parecen tener correlación con el **enjambre 9**.
- 4) Posteriormente, en julio de 2013 se observa otro incremento de sismos localizados al SO del cráter del volcán La Virgen y a profundidades entre 5.6 y 7.1 km (Figuras 3.11a y 11b). Este incremento de sismos compuesto de 6 eventos es identificado como el **enjambre 11**, aunque no muestra una correlación directa con la disminución e incremento brusco de la inyección en el pozo LV8 de 281 t/h a 141 t/h registrada en junio de 2013 (Figura 3.13), no se descarta que estos procesos (disminución e incremento brusco) intervengan en la ocurrencia de enjambres en CVGTV.

- 5) Entre octubre y noviembre de 2013, se identificaron los **enjambres 12 y 13**, con incrementos en la ocurrencia de sismos de hasta 3 eventos por día. Este enjambre ubicado por debajo del pozo LV8 entre los 4.0 y 5.2 km de profundidad ([Figuras 3.11a y 11b](#)), no muestran una correlación directa con la cantidad de inyección, pues cabe señalar que durante este periodo la inyección se mantuvo casi constante en ~278 t/h ([Figura 3.13a](#)).

Considerando las correlaciones obtenidas en la [Figura 3.13](#), los **enjambres sísmicos 1, 2, 3, 4, y 10** muestran una estrecha correlación entre los incrementos del número de sismos y la cantidad de inyección en el LV8 y las pruebas de inyección y estimulación del pozo LV6, similar a lo observado por [Viegas y Hutchings \(2011\)](#) ([Figura 3.13b](#)) en el campo geotermal Geysers, California (Estados Unidos); por lo tanto, sugieren que estos enjambres sísmicos de magnitudes pequeñas, serían “inducidos” por la inyección del agua dentro del yacimiento geotérmico de Las Tres Vírgenes. Estos resultados también son sustentados por su ubicación cercana y por debajo de los pozos **LV6 y LV8**, así como las formas elipsoidales y elongadas que adquieren en su distribución espacial y en profundidad. Estas características típicas de los enjambres han sido ampliamente discutidas por [Hill et al. \(1993\)](#), [Mossop \(2001\)](#), [Stark \(2003\)](#), [Fischer \(2005\)](#), [Cuenot et al. \(2008\)](#), [Viegas y Hutchings \(2011\)](#) ([Figura 3.13b](#)) y [Evans et al. \(2012\)](#).

Con relación a los **enjambres 6 y 7**, éstos serían los únicos enjambres que parecen estar correlacionados con la ocurrencia de los sismos de magnitud mayor ( $M=6.0$  y  $6.8$ ) del 12 de abril de 2012 ( $M = 6.0$  y  $6.8$ ) y localizados a 111 y 113 km en dirección NE de Guerrero Negro y 170 km al NO del CVGTV. A diferencia de los enjambres antes mencionados, los **enjambres 5, 8, 9, 11, 12 y 13**, sugerirían una actividad sísmica netamente tectónica local y regional del CVGTV.

Finalmente, la máxima profundidad de los sismos, entre 8 y 11 km en los alrededores del CVGTV y menor a 6.5 km en la zona central del campo geotérmico (Zona A), por debajo del CVTV, delinearía la posible zona de transición reológica frágil-dúctil (ZT) ([Figura 3.12](#)). Estos resultados son consistentes con los estudios sísmicos anteriores ([Wong et al., 2001](#); [Wong y Munguía, 2006](#); [Lermo et al., 2011](#)).

### 3.4 MECANISMOS FOCALES Y TENSOR DE ESFUERZO

#### 3.4.1 Mecanismos focales

Para establecer el estado de esfuerzos del CVGTV, se obtuvieron mecanismos focales basados en la polaridad de la onda P y la relación de amplitudes de las ondas P y S (S/P). Con este fin se seleccionaron, únicamente sismos con 5 polaridades claramente identificables para aplicar el algoritmo de [Hardebeck y Shearer \(2003\)](#) (HASH) y 6 a más polaridades para utilizar los algoritmos de [Snook et al. \(1984\)](#) (FOCMEC) y [Reasenber y Oppenheimer \(1985\)](#) (FPFIT).

Estos algoritmos, incluidos en el programa SEISAN v.10.3 (Otemöller et al., 2015), asumen el modelo de doble par de fuerzas (DC) para la fuente de ruptura (*shear-slip*) y utilizan las polaridades y amplitudes de la onda P (FOCMEC, FPFIT), relación de amplitudes de las ondas P ( $A_P$ ) y S ( $A_S$ ) dado por:

$$A_P = \sqrt{A_r^2 + A_z^2} \quad (3.2)$$

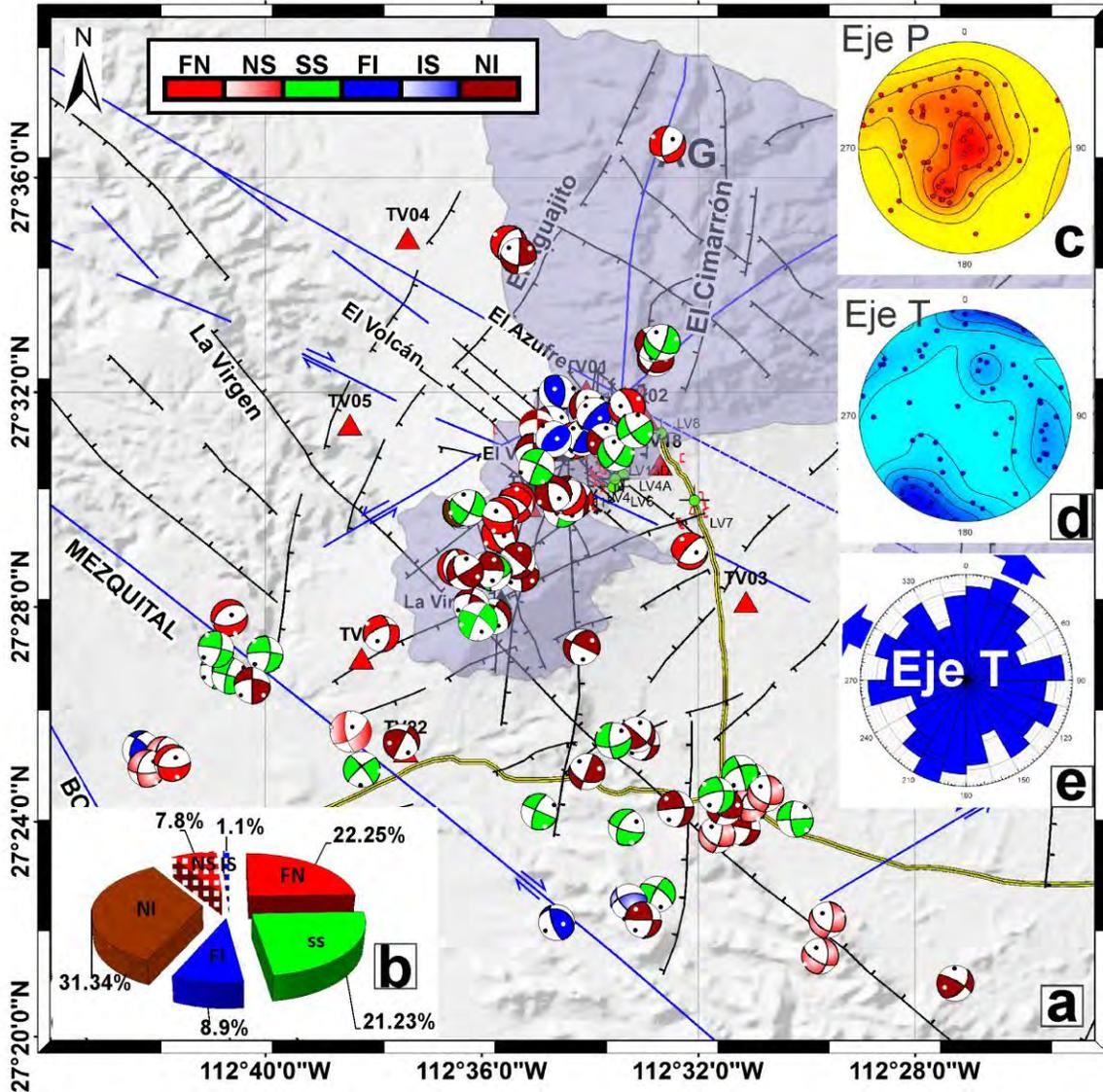
$$A_S = \sqrt{A_{sv}^2 + A_{sh}^2} \quad (3.3)$$

Así, de un total de 575 sismos localizados (Figuras 3.6a y 3.6b), se obtuvieron 91 mecanismos focales, de los cuales 89 fueron obtenidos, individualmente, para el mismo número de sismos (89); mientras que los otros 2 corresponden a mecanismos compuestos que incluyeron hasta 5 sismos. Estos últimos fueron obtenidos, básicamente, para los enjambres 11 y 13 registrados en octubre y noviembre de 2013.

En la Figura 3.14a se presenta el total de mecanismos (91) proyectados en el hemisferio focal inferior de igual área. En general, estos mecanismos focales muestran una variedad de soluciones de planos de falla que fueron clasificados como: fallamientos de tipo normal (FN), normal con componente *Strike-Slip* (NS), *Strike-Slip* (SS), inversa (FI), inversa con componente *Strike-Slip* (IS) y no identificada u oblicua (NI) (Delvaux y Barth, 2010).

De acuerdo a su representación porcentual mostrada en la Figura 3.14b, el mayor porcentaje (31.34 %) corresponde a NI, seguido de FN y SS con 22.25 % y 21.23 % respectivamente.

Asimismo, la distribución general de todos los ejes de presión P y tensión T, ploteados en la proyección esférica de Vollmer (2015) (Figuras 3.14c y 3.14d), muestran una heterogeneidad de esfuerzos orientados en diferentes direcciones. Según Wong y Munguía (2006), esta variabilidad reflejaría las heterogeneidades del campo de esfuerzo de Las Tres Vírgenes. Sin embargo, las dos orientaciones preferenciales de los ejes de tensión T (NE-SO, NO-SE) mostradas en el diagrama de rosas de la Figura 3.14e, reflejaría su correlación con la tectónica regional del Golfo de California. Precisamente, para establecer el estado de esfuerzo del CVGTV, se realizó la inversión del tensor de esfuerzo.



**Figura 3.14.** a) Mecanismos focales obtenidos de 91 sismos, proyectados en el hemisferio focal inferior de igual área. b) Representación porcentual de los tipos de fallamiento según el código de colores mostrado en la parte superior derecha: FN=falla normal; NS=falla normal con componente Strike-Slip; SS=falla Strike-Slip; FI=falla inversa; IS=falla inversa con componente Strike-Slip y NI=no identificada u oblicua. c y d) Proyección esférica de los ejes de presión (P) y tensión (T). e) Diagrama de rosas de los ejes T. Las flechas indican las direcciones preferenciales del total de mecanismos focales.

### 3.4.2 Inversión del tensor de esfuerzo

La inversión del tensor de esfuerzo en el CVGTV, fue realizado utilizando el programa Win-Tensor (Delvaux y Sperner, 2003; Delvaux, 2011) y las metodologías descritas por Angelier y Mechler (1977), Delvaux y Sperner (2003), Delvaux y Barth (2010) y Delvaux (2011). Para ello, se seleccionaron 51 mecanismos focales, de un total de 91 (Figura 3.14a), debido a dos condiciones propias del método: primero, que el esfuerzo es uniforme en espacio y tiempo y segundo, que el deslizamiento de la falla ocurre a lo largo del máximo esfuerzo de cizalla (*shear stress*). Basados en los métodos gráficos denominados diedros rectos o *Right Dihedron* (Angelier y Mechler, 1977) y *Rotational Optimization* (Delvaux y Sperner, 2003) se determinaron 4 parámetros; 3 de ellos corresponden a la orientación de los principales ejes de esfuerzo: máximo  $\sigma_1$ , intermedio  $\sigma_2$  y mínimo  $\sigma_3$ , donde  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  y el cuarto parámetro es la razón de esfuerzo R que define el tamaño relativo del esfuerzo principal intermedio con respecto al máximo y mínimo esfuerzo, Así,

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (3.4)$$

donde: R varía entre 0 y 1 ( $0 < R < 1$ )

El tipo de esfuerzo fue determinado tomando en cuenta la clasificación de Delvaux y Barth (2010) y están expresados como: falla normal (FN), *strike-slip* (SS), falla normal con componente *strike-slip* (NS) (intermedio entre FN y SS), falla inversa (FI), falla inversa con componente *strike-slip* (IS) (intermedio entre FI y SS), falla no identificada u oblicua (NI) y el parámetro de calidad (Q) definido por (Heidbach et al., 2010) en A, B, C y D, que dependen del número de mecanismos focales o sus respectivos planos de fallas que intervienen en la inversión del tensor, además del ajuste de la dirección del deslizamiento teórico y calculado. Con base en el número de mecanismos focales (5 como mínimo) con sus respectivos planos nodales y su proximidad espacial y periodo de tiempo (Figura 3.15), se procedió a efectuar la inversión del tensor de esfuerzo para 4 enjambres sísmicos (1, 8, 9 y 10) y para 3 sistemas de fallas (La Virgen, El Cimarrón y El Mezquital) (Figura 3.15).

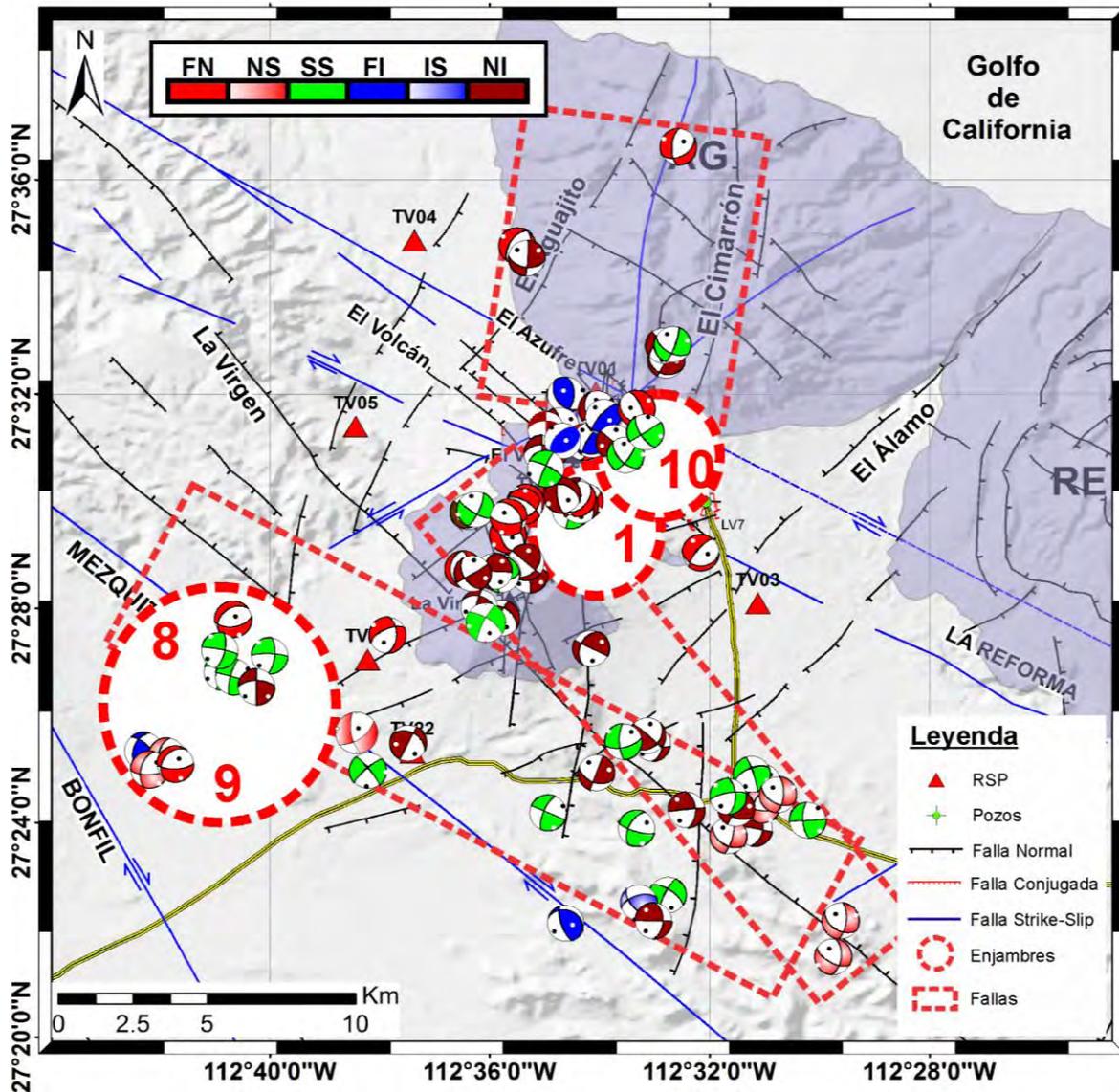
### 3.4.3 Resultados de la inversión y correlación con la tectónica regional y local

En la Figura 3.16 y Tabla 3.3 se presentan los resultados obtenidos de la inversión del tensor de esfuerzos para los enjambres 1, 10, 8 y 9, ubicados en la zona central (Zona A) y en los alrededores (Zona D) del campo geotérmico respectivamente.

- 1) De la inversión del tensor de esfuerzo de 7 mecanismos focales del **enjambre 1** (Figura 3.16a), se muestra como resultado, un fallamiento de tipo normal (FN), de régimen extensivo N118°E, homogéneo en dirección NO-SE y concordante con la orientación de

la falla conjugada (FC) (Rocha y Romero, 2009) y forma parte del sistema de fallas El Volcán (López, 1998).

- 2) La inversión de 5 mecanismos focales para el **enjambre 10** (Figura 3.16b), sugiere un fallamiento de tipo *Strike-Slip*, con régimen compresivo N02°E, orientado NNE-SSO.



**Figura 3.15.** a) Mecanismos focales de los enjambres 1, 8, 9, 10 (círculos discontinuos) y de los sistemas de fallas La Virgen, Mezquital y Cimarrón (rectángulos discontinuos) seleccionados para la inversión del tensor de esfuerzo.

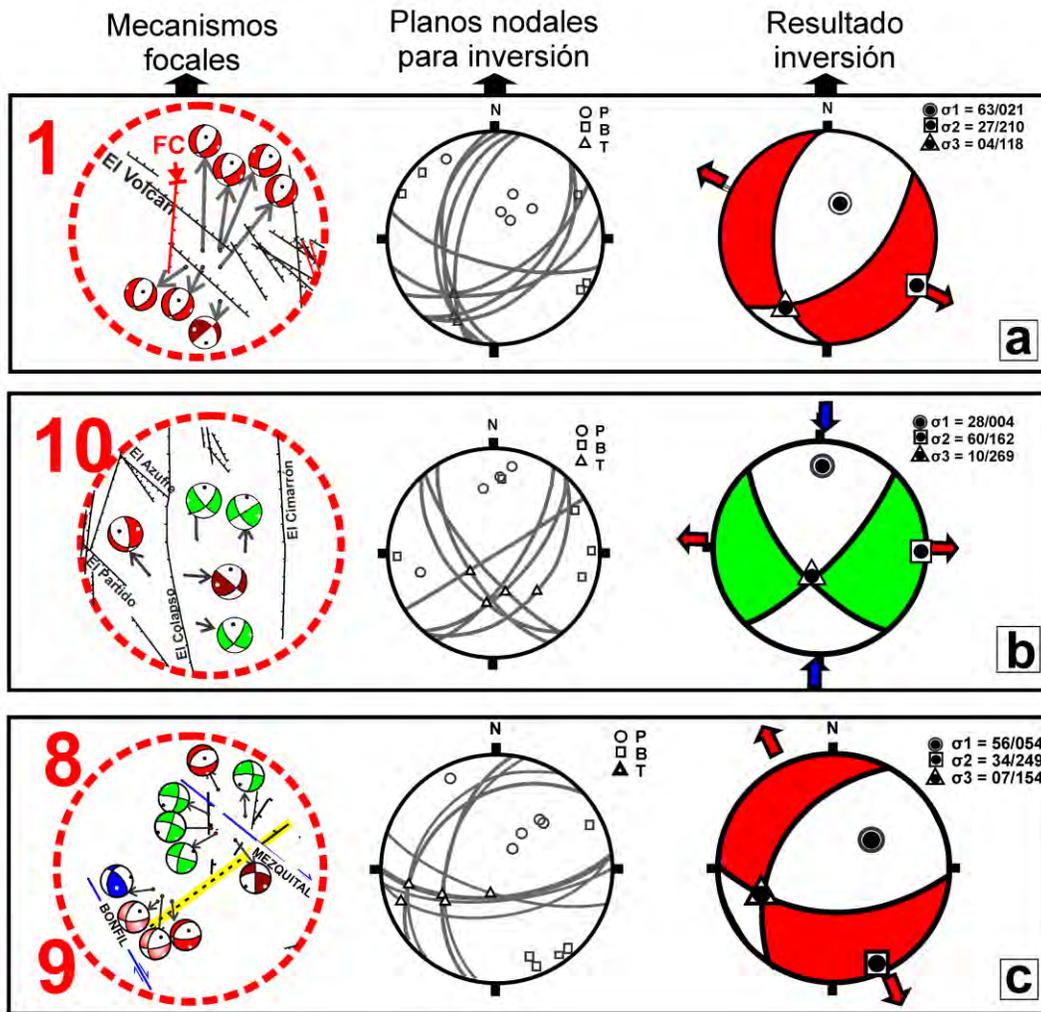
- 3) Mientras tanto, el resultado de la inversión de 10 mecanismos focales para los **enjambres 8 y 9** (Figura 3.16c), muestran un fallamiento normal (FN) y régimen extensivo N153°E, cuya orientación NE-SO difiere de la orientación de las fallas Bonfil y

Mezquital (Macías y Jiménez, 2012); pero concordante con los sistemas de fallas normales, reportadas en el mapa geológico-estructural regional del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2007).

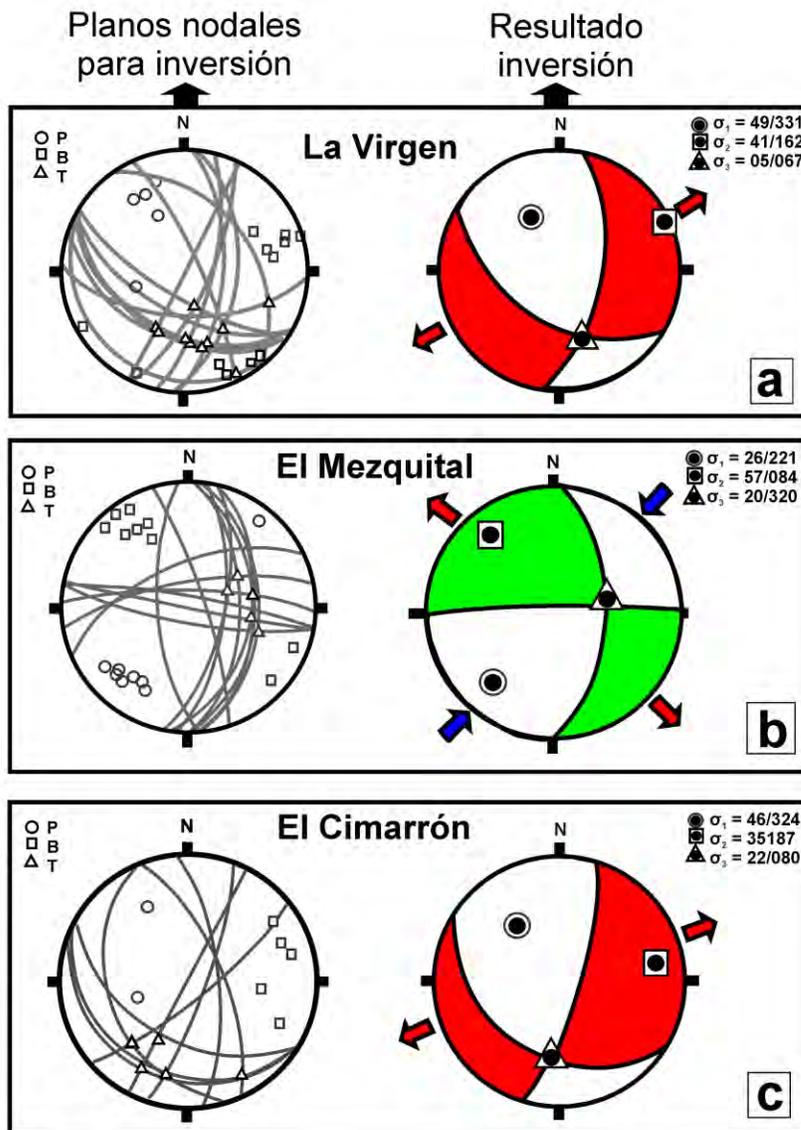
En la Figura 3.17 y Tabla 3.3 se presentan los resultados obtenidos de la inversión del tensor de esfuerzos para los sistemas de fallas La Virgen, El Mezquital y el Cimarrón.

- 1) A lo largo de la traza del sistema de fallas **La Virgen** se seleccionaron 14 mecanismos focales, lo que hacen un total de 28 planos nodales que intervinieron en la inversión. El resultado obtenido sugiere un fallamiento de tipo normal, con una pequeña componente de *Strike-Slip* (NS), con régimen extensivo N63°E y orientado OSO-ENE (Figura 3.17a).
- 2) Los 10 mecanismos focales seleccionados en la traza del sistema del sistema de fallas **El Mezquital**, permitieron obtener el tensor de esfuerzo de la misma, sugiriendo un fallamiento no identificado u oblicuo (NI), con componente SS y régimen compresivo N43°E, orientado N-S (Figura 3.17b).
- 3) Para el sistema de fallas **El Cimarrón**, se seleccionaron 8 mecanismos focales. Los resultados de la inversión sugieren fallamiento NI u oblicuo con componente normal, el régimen de esfuerzo extensivo N70°E y orientado NE-SO (Figura 3.17c).
- 4) La Figura 3.18a muestra el campo de esfuerzos del CVGTV a lo largo de los principales sistemas de fallas. De acuerdo a estos resultados, el régimen tectónico dominante está conformado por fallamientos de tipo normal (FN), normal con componente *Strike-Slip* (NS), no identificada u oblicua (NI) y de tipo *Strike-Slip* (SS). En términos de la orientación de los esfuerzos, el CVGTV se caracteriza por presentar esfuerzos extensivos orientados en dirección NO-SE, E-O y NE-SO.
- 5) Así, el régimen de esfuerzo extensivo (N118°E), orientado NO-SE y obtenido para el **enjambre 1**, sugiere que esta sismicidad inducida reactivó la falla conjugada (FC) pre-existente del sistema de fallas El Volcán (Rocha y Romero, 2009). El régimen de esfuerzo compresivo (N02°E) orientado SO-NE y obtenido para el enjambre 10, muestra una estrecha correlación con el régimen de esfuerzo regional del sistema de fallas La Reforma-El Azufre. Similares resultados fueron obtenidos por Wong y Munguía (2006) y Sumy et al. (2013) (Figura 3.18b).
- 6) Los **enjambres 8 y 9**, asociados a la activación y/o reactivación del sistema de fallas normales mapeadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2007), sugieren un régimen de esfuerzo extensivo (N153°E). Con relación a los sistemas de fallas La Virgen y el Cimarrón, los resultados muestran regímenes de esfuerzos extensivos (N63°E; N70°E) orientados OSO-ENE y NE-SO y estrechamente correlacionados con los

estudios geológico-tectónicos de López (1998), López et al. (1994), Rocha y Romero (2009) y Macías y Jiménez (2012). Para el sistema de fallas El Mezquital, el régimen de esfuerzo compresivo obtenido (N43°E) se orienta en dirección NE-SO. Este régimen de esfuerzo no parece estar correlacionado al régimen de esfuerzo regional de este sistema de fallas; sin embargo, los mecanismos de tipo indefinido u oblicuo parecen reflejar cambios en el régimen de esfuerzo debido a la complejidad estructural que, particularmente, se representa esta zona del CVGTV (Benton et al., 2011; Macías y Jiménez, 2012).



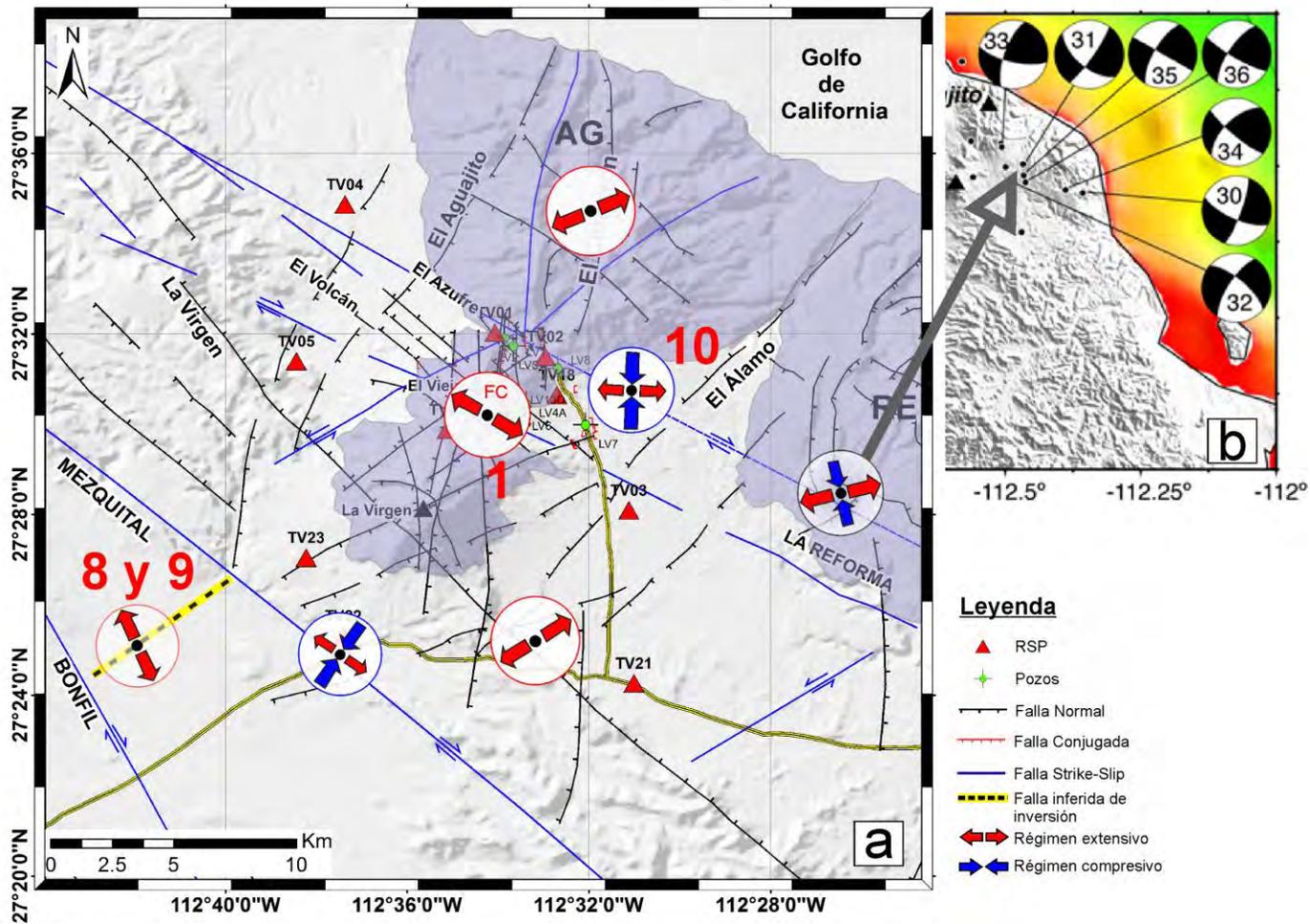
**Figura 3.16.** a) De izquierda a derecha se presenta la ubicación de los enjambres con sus respectivos mecanismos focales que intervinieron en la inversión del tensor de esfuerzo (derecha), los estereogramas conteniendo los planos nodales con sus respectivos ejes P, B y T (centro) y la solución del tensor de esfuerzo con la orientación de los esfuerzos máximo ( $\sigma_1$ ), intermedio ( $\sigma_2$ ) y mínimo ( $\sigma_3$ ) (izquierda), para: a) El enjambre 1, b) el enjambre 10 y c) los enjambres 8 y 9. La línea amarilla resalta la posible continuidad de la falla normal reportada en el mapa geológico-estructural regional del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2007).



**Figura 3.17.** De izquierda a derecha se presentan los estereogramas conteniendo los planos nodales con sus respectivos ejes P, B y T (izquierda) y la solución del tensor de esfuerzo con la orientación de los esfuerzos máximo ( $\sigma_1$ ), intermedio ( $\sigma_2$ ) y mínimo ( $\sigma_3$ ) (izquierda), para los sistemas de fallas: a) La Virgen, b) El Mezquital y c) El Cimarrón. Otros símbolos como en la [Figura 3.14](#).

**Tabla 3.3.** Resultados de la inversión del tensor de esfuerzo para los enjambres sísmicos y fallas. N°mf= número de mecanismos focales; N°pn=número de planos nodales;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  son los ejes de esfuerzos; pl=*plunge*; az= azimut; Q= calidad;  $\alpha$ = ángulo de ajuste promedio; R'= régimen de esfuerzo numérico; Aver.= promedio; FN= falla normal; NS= falla normal con componente Strike-Slip; SS= falla *Strike-Slip*; NI= falla no identificada u oblicua.

ID	Ubicación	N°mf	N°pn	Parámetros del tensor de esfuerzo						Calidad (Q)		Régimen de esfuerzo tectónico							
				$\sigma_{1pl}$	$\sigma_{1az}$	$\sigma_{2pl}$	$\sigma_{2az}$	$\sigma_{3pl}$	$\sigma_{3az}$	$\alpha$ Aver.	Q	Reg.	R'	$\sigma_1$ Aver.	$\sigma_3$ Aver.	Diff.			
<b>ENJAMBRES</b>																			
1	El Volcán	14	14	063	021	27	210	04	118	3.7	B	FN	0.86	28	27.7	118	117.7	0.3	
10	La Reforma-El Azufre	10	7	25	001	64	195	06	093	9.9	C	SS	1.66	002	000.7	92	90.7	1.3	
8-9	Bonfil-El Mezquital	6	8	57	052	32	249	08	154	5.6	C	FN	0.76	063	60.9	153	150.9	2.1	
<b>FALLAS</b>																			
LV	La Virgen	18	10	49	331	41	162	40	161	4.6	B	NS	0.21	153	153.7	63	62.6	0.7	
Mez	El Mezquital	17	13	24	222	65	060	07	315	10.2	A	SS	1.83	043	42.2	133	132.2	0.8	
Cim	El Cimarrón	10	8	46	324	35	187	22	080	11.1	B	NI	0.48	160	159.3	70	69.3	0.7	



**Figura 3.18.** a) Mapa tectónico del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Virgenes (CVGTV) y la orientación del campo de esfuerzos obtenidos de la inversión. La flecha indica la inversión del tensor de esfuerzo obtenido con los mecanismos focales de [Sumy et al. \(2013\)](#) (b). FC = falla conjugada; AG = caldera Aguajito; RE = caldera La Reforma; RSP = Red Sísmica Permanente.

### 3.5 ATENUACIÓN DE ONDAS DE CODA ( $Qc^{-1}$ )

Las ondas de coda, son aquellas ondas que forman la parte final del registro sísmico. Estas ondas al igual que otras ondas sísmicas experimentan la atenuación de su amplitud debido a la presencia de heterogeneidades en el interior de la Tierra (Aki, 1969; Aki y Chouet, 1975). La primera investigación de ondas de coda fue publicado por Aki (1969), el autor propuso que las ondas de coda se propagan en un medio homogéneo e isotrópico, donde las heterogeneidades están uniformemente distribuidas y donde la distancia fuente-dispersor es mayor a la distancia dispersor-receptor. Este modelo fue denominado como *modelo de retrodispersión simple* y fue la inspiración de otros modelos como los de dispersión isotrópica simple de Sato (1977) y determinación de la absorción intrínseca y atenuación por dispersión de Hoshiaba (1991).

En este estudio, se utiliza el modelo de retrodispersión simple de Aki y Chouet (1975). De acuerdo al modelo, la envolvente de desplazamiento  $A(f,t)$  de las ondas de coda en una banda de frecuencias  $f$  puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\ln[t^2]A_{obs}[f(r,t)] = C - Qc^{-1}2\pi ft \quad (3.5)$$

donde:  $C$  es una constante que depende de la frecuencia,  $A_{obs}[f(r,t)]$  es la amplitud media del registro,  $\ln$  es el logaritmo natural,  $t$  es el tiempo medido desde el tiempo origen del sismo y  $Qc$  es el factor de calidad de las ondas de coda que contiene información de la atenuación de la energía sísmica de una determinada zona.

El modelo de Aki y Chouet (1975), a su vez, asume que la coda del sismo local está compuesta por la suma de ondas S producidas por heterogeneidades distribuidas uniformemente dentro del medio en el cual se propaga. Por lo tanto, la coda es la porción del sismograma correspondiente a la retrodispersión de las ondas S donde la fuente y el receptor se encuentran en el mismo punto y la radiación es esférica. Este modelo es válido únicamente para ondas que arriban 2 veces después del tiempo de arribo de las ondas S.

$$T = 2t_s + \left(\frac{t_v}{2}\right) \quad (3.6)$$

De acuerdo a estas consideraciones, la ecuación (3.3.1) también puede ser expresada como:

$$Y = bX + C \quad (3.7)$$

donde:

$$Y = \ln[t^2]A_{obs}[f(r,t)] \quad (3.8)$$

$$X = 2\pi ft \quad (3.9)$$

$$b = Qc^{-1} \quad (3.10)$$

$Qc^{-1}$  es la inversa del factor de calidad ( $Qc$ ) expresada en términos de atenuación sísmica calculada a partir de la pendiente  $b$ , utilizando para ello la solución de mínimos cuadrados. Este factor  $Qc$  o su inversa  $Qc^{-1}$ , es la suma de la atenuación intrínseca y de la atenuación por dispersión (scattering). En zonas volcánicas y geotérmicas, la atenuación intrínseca está correlacionada con cambios de temperatura y contenido y viscosidad de fluidos (Gao, 1992); mientras que la atenuación por scattering está correlacionada con actividad tectónica intensa.

### 3.5.1 Estimación Coda $Qc$ y leyes de atenuación del CVGTV

Para la estimación del factor de calidad  $Qc$ , se utilizaron los registros digitales de los 575 sismos localizados en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (Anexo 1). Estos eventos fueron registrados durante el periodo 2003-2013 por las estaciones temporales (RST) y permanentes (RSP) de Las Tres Vírgenes (Figura 3.2).

Para el procesamiento y cálculo de  $Qc$ , se hizo uso del algoritmo *Codaq* implementado dentro del programa SEISAN v. 10.3 (Otemöller et al., 2015). Este algoritmo requiere como datos de entrada: las estaciones sísmicas, el registro sísmico, una ventana de señal sísmica, la velocidad promedio de las ondas S ( $Vs$ ), la densidad promedio de la corteza ( $\rho$ ), las bandas frecuenciales, la relación señal-ruido y un mínimo de coeficiente de correlación mínima. En este estudio, se estableció una ventana de señal sísmica de 6 segundos,  $Vs = 2.4$  km/s, obtenido del modelo de velocidad del CVGTV (modificado de Rodríguez, 2000),  $\rho = 2.8$  gr/cm<sup>3</sup>, bandas frecuenciales centradas en 2, 4, 8 y 16 Hz. Asimismo, se consideró la relación señal/ruido  $> 2$  y un coeficiente de correlación mínima de 0.6 ( $R^2 \geq 0.6$ ).

Los resultados del rango de valores de  $Qc$  obtenidos para todo el CVGTV, así como para cada una de las zonas sísmicas son presentados en la Figura 3.19 y Tabla 3.4. Obsérvese que  $Qc$  varía entre 15.2 y 183.7 para la frecuencia  $f=2$  Hz, entre 38.8 y 213.3 para  $f= 4$  Hz, entre 71.5 y 302.3 para  $f=8$  Hz y entre 138.4 y 463.9 para  $f=16$  Hz.

A partir de los valores de  $Qc$ , se obtuvo  $Qc$  promedio para cada una de las bandas frecuenciales establecidas previamente y se graficó  $Qc$  como una función de la frecuencia  $f$  ( $Qc$  vs  $f$ ) para estimar la ley de atenuación del CVGTV, considerando para ello, la relación potencial propuesta por Aki (1980a, 1980b):

$$Qc = Qof^n \quad (3.11)$$

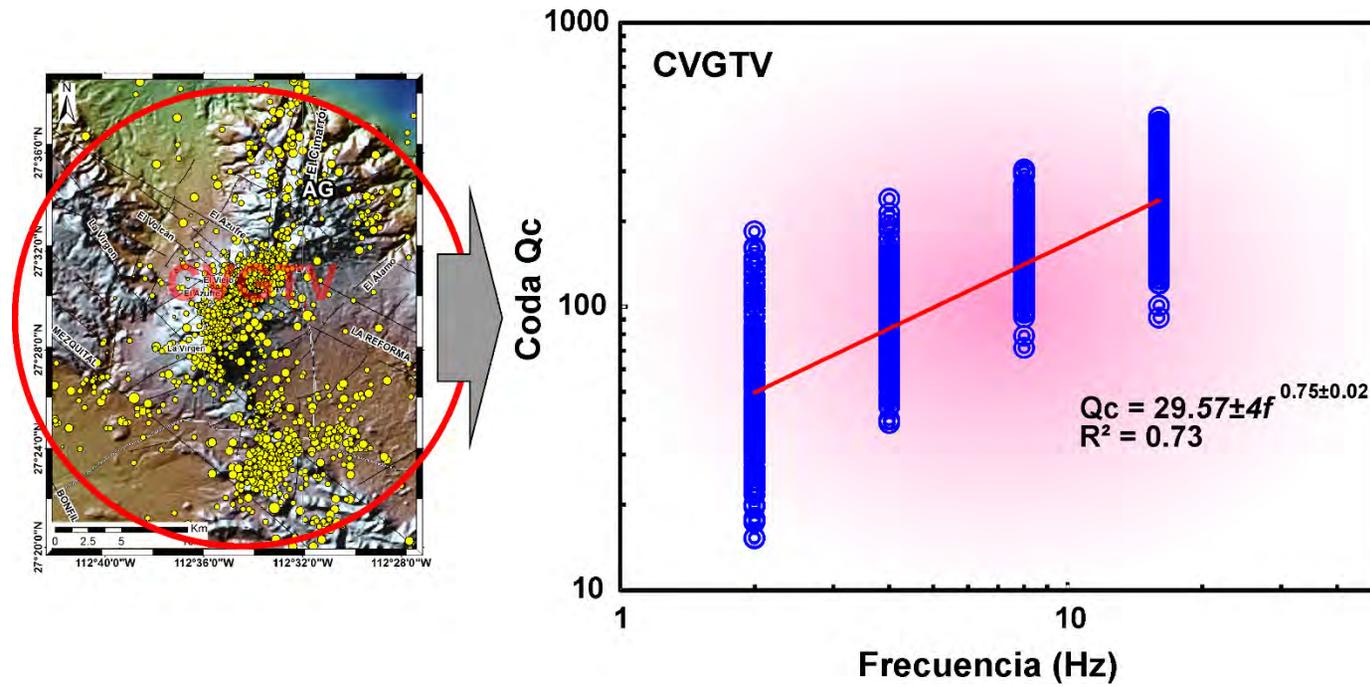


Figura 3.19. Ley de dependencia frecuencial estimada con el total de sismos registrados el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV).

**Tabla 3.4.** Rango de valores de  $Q_c$  obtenidos para todo el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y las 4 zonas sísmicas;  $f$  es la frecuencia central en Hertz (Hz).

$f$ (Hz)	Valores de $Q_c$				
	(CVGTV)	(Zona A)	(Zona B)	(Zona C)	(Zona D)
<b>2</b>	15.2-183.7	17.9-107.0	28.4-81.0	15.3-183.7	15.2-130.5
<b>4</b>	38.8-213.3	39.9-158.2	72.2-130.3	38.8-213.3	50.9-152.3
<b>8</b>	71.5-302.3	71.5-302.3	112.8-184.8	109.1-298.2	95.1-220.3
<b>16</b>	138.4-463.9	120.4-438.2	183.7-392.2	142.5-463.9	138.4-429.2

$Q_0$ , es  $Q_c$  a la frecuencia de 1 Hz y  $\eta$  es el coeficiente de anelasticidad. Ambos parámetros están correlacionados con las características geológicas, sísmicas y tectónicas de cada región o zona de estudio. En este contexto,  $Q_0$  representa la heterogeneidad del medio (geología), donde los bajos valores de  $Q_0$  representarían zonas de alta atenuación debido a la heterogeneidad del medio; mientras que en zonas relativamente estables los valores tienden a ser más altos (Paul et al., 2003; Singh and Herrmann, 1983). Contrariamente a  $Q_0$ , los valores altos de  $\eta$  (>0.6) representan alta actividad sísmica y tectónica.

Así, para el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes, se estimó un valor  $Q_c$  a la frecuencia de 1 Hz promedio de:

$$Q_c = 29.57 \pm 04f^{0.75 \pm 0.03}$$

donde  $Q_0 = 29.57$  y  $\eta = 0.75$ .

Esta ley de atenuación con valores *bajos* de  $Q_0$  y *altos* de  $\eta$  (Figura 3.19), se correlaciona muy bien con los estudios geológicos, tectónicos y sísmicos del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes; es decir, existe una alta heterogeneidad del medio e intensa actividad sísmica y tectónica de carácter local y regional, especialmente en la zona central de este campo (Zona A); además se encuentra dentro del rango de valores obtenidos por Antayhua et al. (2008), Vargas et al. (2006), Wong et al. (2001), Londoño (1996) y Havskov et al. (1989), en campos volcánicos y geotérmicos (Tabla 3.5).

En contraste a estos valores *bajos*, Domínguez et al. (1997) estimaron  $Q_0=111.1$  y  $\eta=0.41$  en el campo geotérmico de Cerro Prieto los cuales son comparables a los obtenidos en zonas relativamente estables ( $Q_0>100$ ,  $\eta<0.5$ ) donde el nivel de heterogeneidad geológica, tectónica y sísmica es baja o reducida. Aunque Las Tres Vírgenes y Cerro Prieto son dos campos geotérmicos, los valores de  $Q_0$  y  $\eta$  difieren entre sí, sugiriendo que el nivel de heterogeneidad geológica, tectónica y sísmica del campo geotérmico de Cerro Prieto (almenos para el periodo analizado por Domínguez et al. (1997), es menor con respecto a Las Tres Vírgenes.

**Tabla 3.5.** Rango de valores del factor de calidad  $Q_c$  a la frecuencia de 1 Hz y el coeficiente de anelasticidad  $\eta$  obtenidos en este estudio y otras zonas volcánicas y geotérmicas.

Referencias	$Q_0$	$\eta$	Zonas
<b>Este estudio</b>	<b>29.6</b>	<b>0.73</b>	<b>Las Tres Vírgenes</b>
Wong et al. (2001)	50	0.65	Las Tres Vírgenes
Antayhua et al. (2008)	24	0.87	Los Humeros
Vargas et al. (2006)	36	0.72	Volcán Nevado El Ruiz
Londoño (1996)	30	1.03	
Domínguez et al. (1997)	111.1	0.41	Cerro Prieto
Havskov et al. (1989)	63	0.97	Volcán Santa Elena

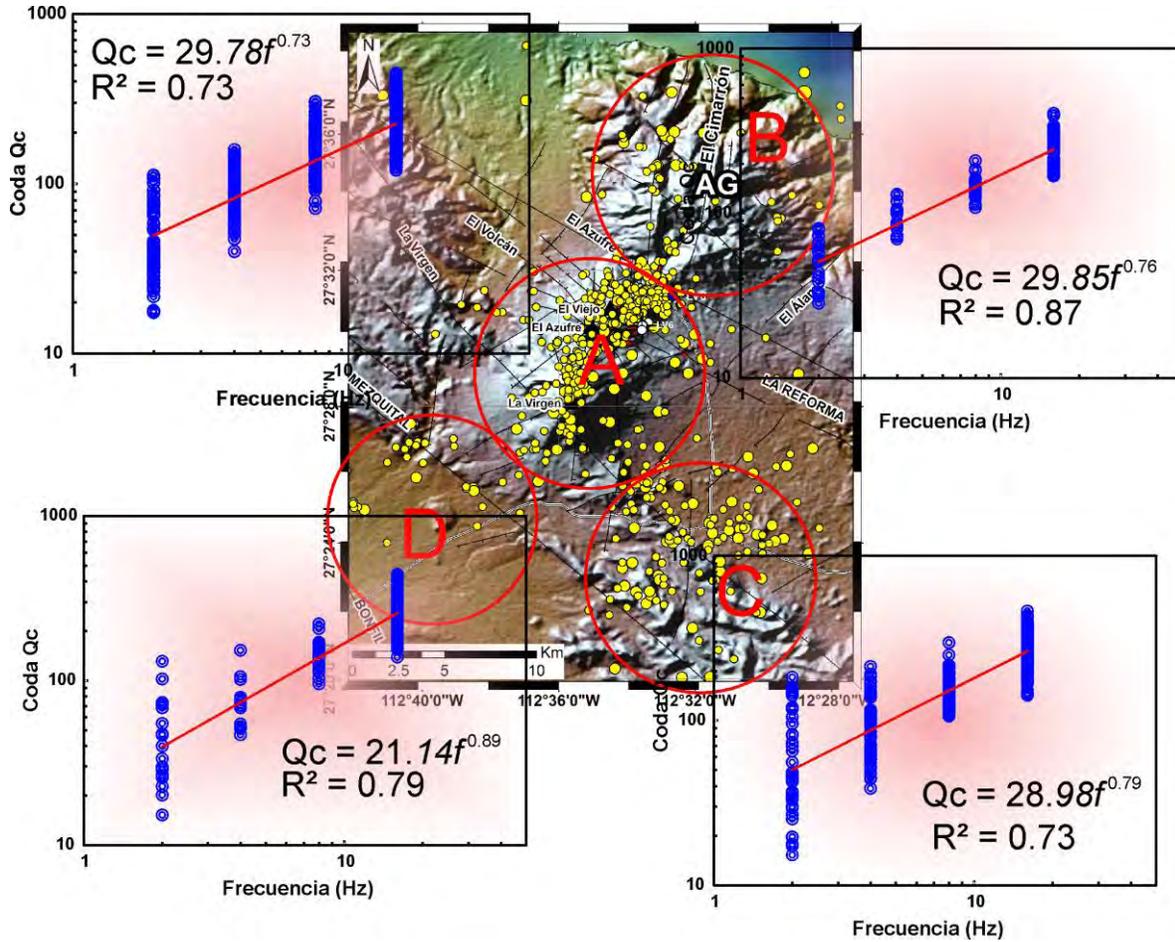
### 3.5.2 Leyes de atenuación por zonas sísmicas

Considerando que las características geológicas y tectónicas de este campo geotérmico difieren relativamente entre la zona central (Zona A) y las zonas periféricas (Zonas B, C y D) (Figura 3.7) se estima, también, la ley de atenuación promedio para cada una de estas zonas.

Los resultados obtenidos (Figura 3.20, Tabla 3.6) muestran que las leyes de atenuación de todo el campo geotérmico (CVGTV) y los obtenidos para las zonas A, B, C y D, son similares entre sí, tanto en los valores de  $Q_0$  y  $\eta$ , aunque cabe señalar que para las zona C y D,  $Q_0$  es relativamente menor a lo estimado en las otras zonas, lo que sugeriría la existencia de un nivel de heterogeneidad importante además de una alta actividad tectónica y sísmica que año tras año se evidencia con el incremento de sismicidad y la ocurrencia de enjambres sísmicos como los registrados en el año 2012 y 2013.

Zonas	Ley de atenuación $Q_c = Q_0 f^\eta$	R <sup>2</sup>
<b>CVGTV</b>	<b><math>Q_c = 29.57 \pm 4 f^{0.75 \pm 0.03}</math></b>	<b>0.73</b>
Zona A	$Q_c = 29.78 \pm 5 f^{0.73 \pm 0.03}$	0.73
Zona B	$Q_c = 29.85 \pm 4 f^{0.76 \pm 0.02}$	0.87
Zona C	$Q_c = 28.98 \pm 4 f^{0.79 \pm 0.04}$	0.73
Zona D	$Q_c = 21.14 \pm 6 f^{0.89 \pm 0.03}$	0.79

**Tabla 3.6.** Leyes de atenuación obtenidas para todo el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y las zonas sísmicas A (centro), B (Aguajito), C (sur de la falla La Virgen) y D (entre fallas Bonfil-Mezquital).



**Figura 3.20.** Rango de valores de  $Q_c$  y ajuste de la ley de dependencia frecuencial para las 4 zonas sísmicas. Obsérvese que el valor más bajo de  $Q_0$  y más alto de  $\eta$  corresponden a la Zona D (Bonfil-Mezquital).

### 3.5.3 Leyes de atenuación por estaciones sísmicas

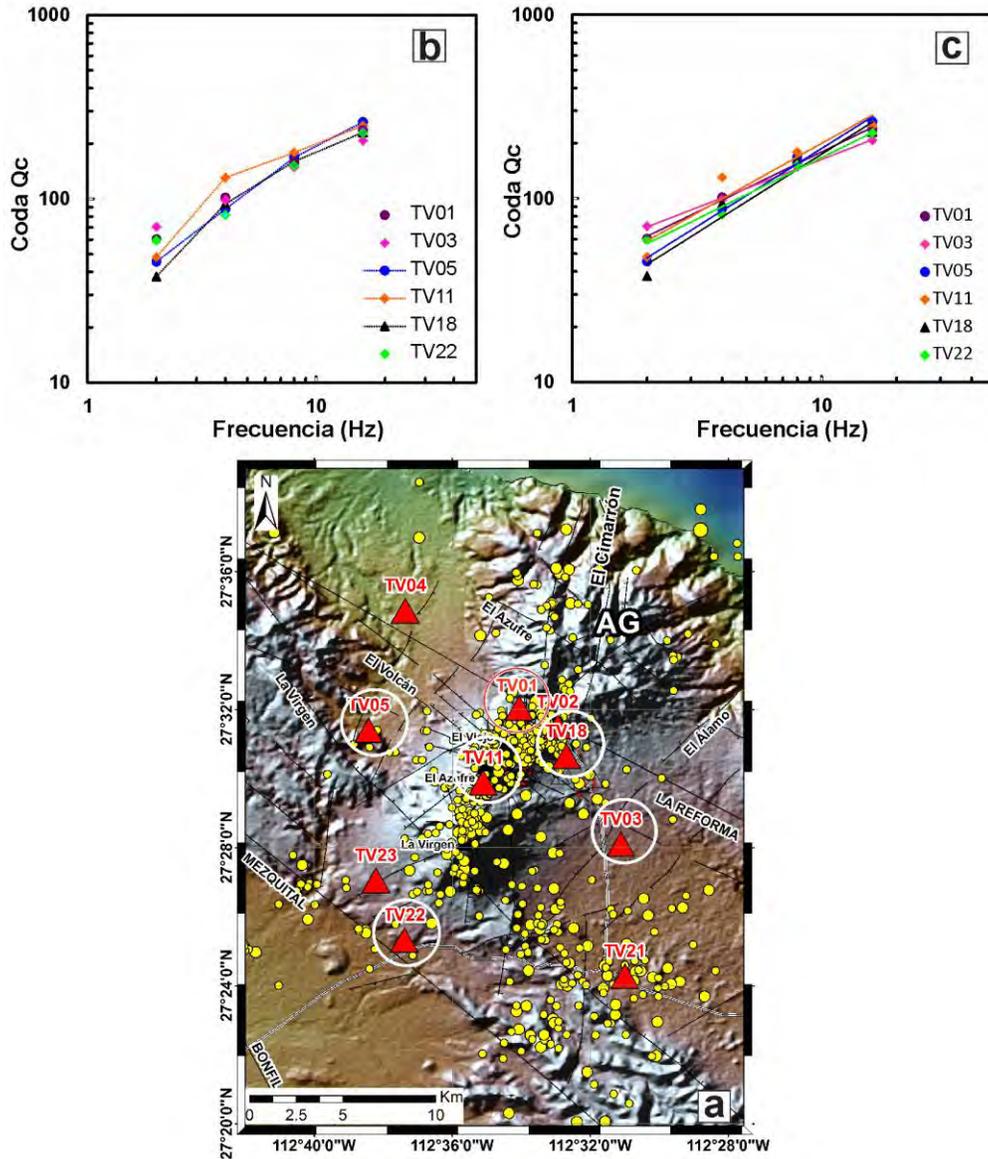
Para este análisis se han seleccionado, solamente, las estaciones sísmicas donde se calcularon más de 10 valores de  $Q_c$ , para cada una de las frecuencias centrales (2, 4, 8, 16 Hz). Con base en esta consideración, se seleccionaron 7 estaciones sísmicas: TV01, TV03, TV05, TV11, TV18 y TV22 (Figura 3.21a). De estas estaciones, TV11 y TV18 están instaladas dentro del campo geotérmico (Zona A) donde la actividad sísmica y tectónica es intensa. Las Figuras 3.21b, 3.21c y la Tabla 3.7 muestran los resultados obtenidos. Los valores bajos de  $Q_0$  y valores altos de  $\eta$  corresponden a las estaciones TV05, TV18 y ligeramente en TV11, además en estas dos últimas estaciones (TV18 y TV11) se presentaron valores anómalos de  $Q_c$  (38 y 130) para las frecuencias 2 y 4 Hz respectivamente (Figura 3.21b). Estos valores podrían estar influenciados por la heterogeneidad geológica y tectónica en la zona central del campo geotérmico, donde se llevan a cabo las operaciones de producción del vapor geotérmico.

En contraste con los valores de  $Q_0 = 4.3$ , y altos de  $\eta = 1.33$  estimados en la estación Residencia (E1) o TV01 por Wong et al. (2001), en este estudio, no se obtuvieron valores considerablemente bajos; sin embargo, es preciso recordar que durante el periodo de análisis de Wong et al. (2001), las operaciones de producción del vapor geotérmico se realizaban muy próximas a esta estación; probablemente estos procesos habrían influenciado en la disminución de estos valores, de hecho, estos valores son comparables con los obtenidos por Moncayo et al. (2004) mediante el análisis temporal de los valores de  $Q_c$  y sus correspondientes leyes de atenuación antes y después de algunas erupciones del volcán Galeras (Colombia) entre 1989 y 1992. Así, estos autores reportaron valores de  $Q_0=2.8$  (antes) y  $Q_0=6.8$  (después), los cuales fueron atribuidos a los procesos de apertura y cierre de fracturas por el ascenso de magma y presencia de gases, así como a la posterior relajación del sistema volcánico.

### 3.5.4 Regionalización de coda $Q_c$

Para conocer la distribución espacial de  $Q_c$  en el CVGTV, se ha seleccionado el método de *regionalización por el punto medio* propuesto por Jin y Aki (1988), que consiste en asignar el valor de  $Q_c$  al punto medio entre la estación y el epicentro. Para ello se utilizaron todos los valores de  $Q_c$  con sus respectivas frecuencias y se elaboraron mapas de iso-valores de  $Q_c$  para las frecuencias centrales de 2, 4, 8 y 16 Hz. Estos mapas fueron realizadas con el programa Surfer versión 12.0 y empleando el interpolador *Kriging*. Cabe señalar que esta técnica suaviza las variaciones laterales de la atenuación; sin embargo, proporcionan una aproximación preliminar de su distribución (Jin y Aki, 1988; Canas et al., 1995; Pujades et al., 1997; Monsalve, 2007).

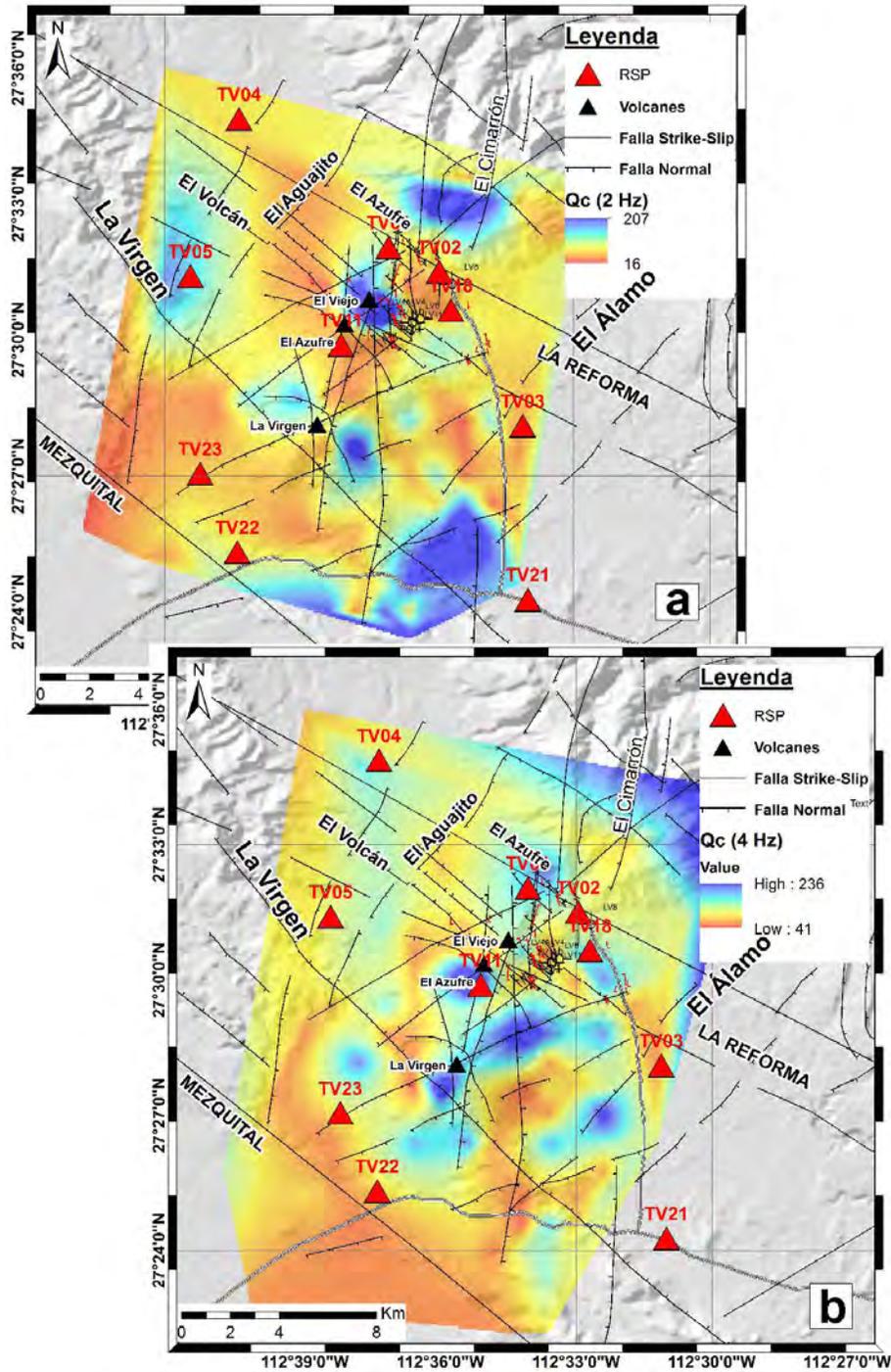
En las Figuras 3.22a-3.22d se muestran los mapas tectónicos del CVGTV sobrepuestos con los iso-valores de  $Q_c$ , contruidos para las frecuencias centrales de 2, 4, 8 y 16 Hz. En las tres primeras figuras (Figuras 3.22a, 3.22b y 3.22c) se observan que valores *bajos* de  $Q_c$ , cuyo rango de  $Q_c$  está reportada en la Tabla 3.4 y en la leyenda de cada figura (recuadro en color rojo), indican zonas de *alta* atenuación sísmica ( $Q_c^{-1}$ ). Así, la regionalización de isovalores de  $Q_c$  permitió identificar zonas de alta atenuación a lo largo del lineamiento del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes (La Virgen, El Azufre, El Viejo) (Figuras 3.22a), al NO del cráter del volcán La Virgen (Figuras 3.22b) y los bordes de los sistemas de fallas regionales de tipo normal y strike-slip (Figuras 3.22a, 3.22b y 3.22c). A frecuencias altas ( $f=16$  Hz) (Figura 3.22d), las anomalías de alta atenuación se localizan entre los volcanes el Azufre y El Viejo, donde además, se ubican los pozos de inyección y producción (procesos de explotación geotérmica).



**Figura 3.21.** a) Ubicación de las estaciones sísmicas seleccionadas para la estimación de  $Q_c$  y sus correspondientes leyes de atenuación. b) Distribución de los valores promedio de  $Q_c$  y su variación con respecto a la frecuencia. Obsérvese que las estaciones TV11 y TV18 presentan valores anómalos a las frecuencias de 2 y 4 Hz respectivamente. c) Ajuste de la ley de dependencia frecuencial para cada una de las estaciones sísmicas.

Estación sísmica	Ley de atenuación $Q_c = Q_0 f^n$	R <sup>2</sup>
TV01	$Q_c = 39.49 \pm 2 f^{0.66 \pm 0.01}$	0.99
TV03	$Q_c = 48.56 \pm 5 f^{0.53 \pm 0.03}$	0.99
TV05	$Q_c = 26.34 \pm 2 f^{0.85 \pm 0.03}$	0.99
TV11	$Q_c = 34.69 \pm 4 f^{0.76 \pm 0.04}$	0.91
TV18	$Q_c = 24.14 \pm 5 f^{0.86 \pm 0.04}$	0.96
TV22	$Q_c = 35.61 \pm 3 f^{0.67 \pm 0.03}$	0.99

**Tabla 3.7.** Leyes de atenuación obtenidas para 6 estaciones sísmicas instaladas en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV).



**Figura 3.22.** Mapa de iso-valores de  $Q_c$  a la frecuencia  $f$  de 2 Hz (a), 4 Hz (b), 8 Hz (c) y 16 Hz, sobrepuestas al mapa tectónico. Los valores *bajos* de  $Q_c$  o anomalías de *alta* atenuación están representadas por el color rojo; mientras que los valores *altos* de  $Q_c$  o *baja* atenuación están en color azul. RSP= Red Sísmica Permanente.

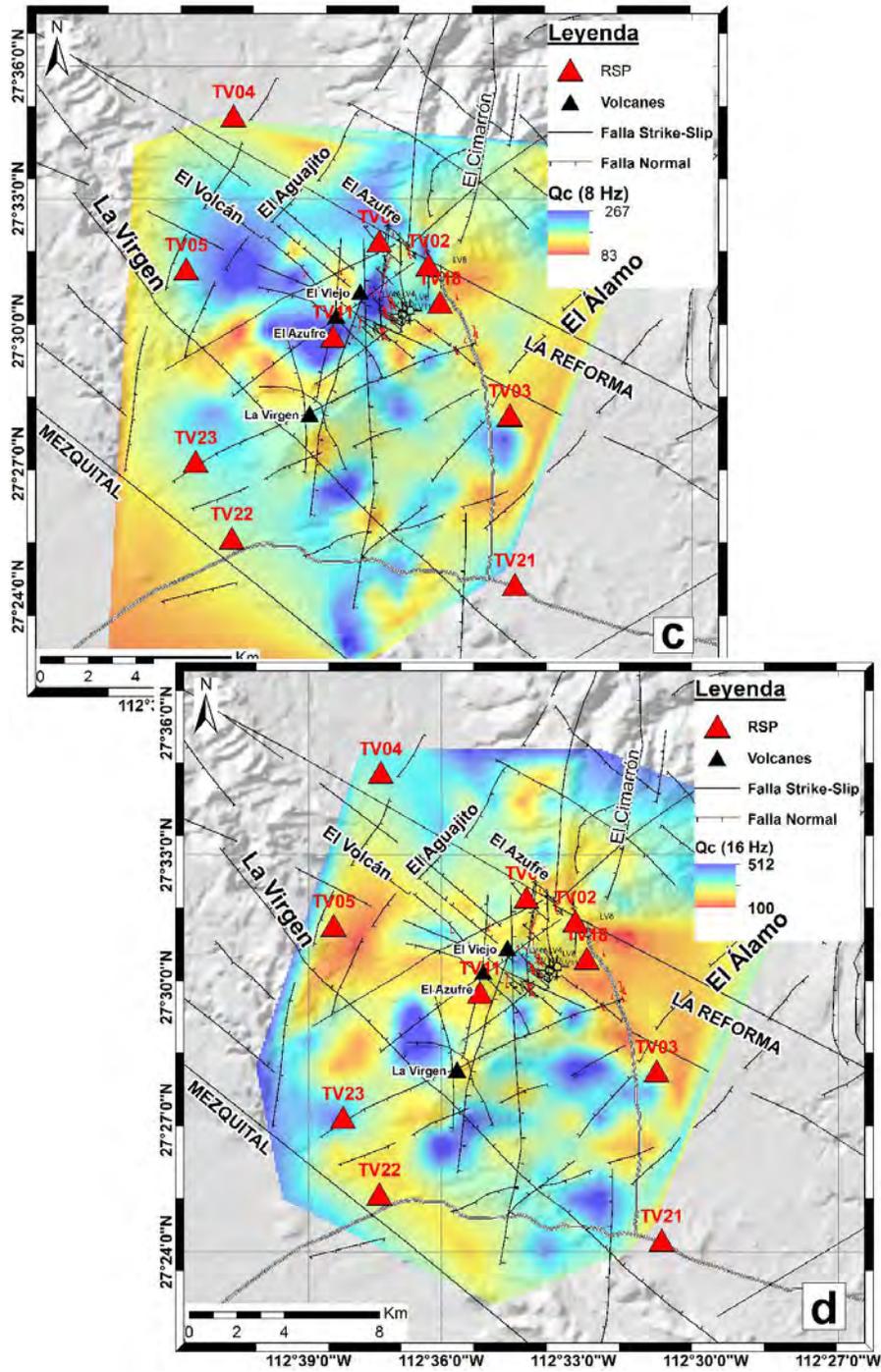


Figura 3.22. Continuación...

### 3.6 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUENTE

Otro de los objetivos de los estudios sismológicos, es conocer los parámetros de la fuente sísmica representados por el momento sísmico, caída de esfuerzo, el radio de ruptura, la frecuencia esquina y la magnitud de momento y establecer su correlación entre ellos. De acuerdo a la ley de escalamiento del espectro sísmico, la caída de esfuerzo para sismos tectónicos regionales y locales, incluido los inducidos por procesos de explotación geotérmica (Goertz-Allman et al., 2011), fracturamiento hidráulico (Mandal et al., 1998; Mukuhira et al., 2013), explotación de minas (Yamada et al., 2007), cambios en los niveles de agua en un determinado reservorio (Tomic et al., 2009), entre otros, exhiben incrementos de caída de esfuerzos y disminución de la frecuencia esquina con respecto al momento sísmico (Scherbaum y Kisslinger, 1984; Abercrombie y Leary, 1993; 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. Por lo general, presentan caídas de esfuerzo más bajas que los sismos tectónicos. Algunos autores también sugieren que estas diferencias podrían estar asociados a la profundidad hipocentral de los sismos, a las dificultades para corregir los efectos de atenuación y/o efectos de sitio (Anderson, 1997; Abercrombie, 1995; Ide et al., 2003) que podrían dar lugar a la sobreestimación de la caída de esfuerzo o viceversa.

Para estimar los parámetros de fuente, tales como el momento sísmico ( $M_0$ ), frecuencia esquina ( $F_c$ ), radio de fractura ( $R$ ), caída de esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) y magnitud de momento ( $M_w$ ), se utilizaron las ecuaciones propuestas por Brune (1970), Hanks y Kanamori (1979), Eshelby (1957) y Madariaga (1976).

El modelo de Brune (1970), ampliamente utilizado en diferentes ambientes geológicos y tectónicos, comprende el análisis del espectro de desplazamiento de la fuente  $S(f)$ . Éstos se caracterizan por presentar una parte plana donde la amplitud se mantiene constante y luego se produce el decaimiento de la amplitud con pendiente  $\omega^{-2}$ . La intersección entre la parte plana y el decaimiento es conocido como la frecuencia esquina ( $f_c$ ) que es inversamente proporcional al radio de fractura ( $R$ ).

$$S(f) = \frac{(M_0)}{[1+(\frac{f}{f_c})^2]^{4\pi\rho v^3}} \quad (3.12)$$

De la ecuación anterior, el  $M_0$  se representa por:

$$M_0 = 4\pi\rho\beta^3 \frac{r}{R^5} \Omega_0 \quad (3.13)$$

donde:  $M_0$  es el momento sísmico en Newton por metro (Nm),  $\rho$  es la densidad en gramos por centímetro cúbico ( $\text{gr}/\text{m}^3$ ),  $\beta$  es la velocidad de la onda S en metros/segundo),  $r$  es la distancia

fuente-estación en metros (m),  $R^s$  es el patrón de radiación de la onda S y  $\Omega$  es la parte plana del espectro en metros por segundo (ms).

El momento sísmico ( $M_0$ ) también puede ser transformado en términos de magnitud de momento ( $M_w$ ) mediante la ecuación propuesta por [Hanks y Kanamori \(1979\)](#):

$$M_w = \left( \frac{\text{Log} M_0}{1.5} \right) - 6.07 \quad (3.14)$$

Asimismo, asumiendo una falla circular ([Eshelby, 1957](#)) se estima la caída de esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) a partir del momento sísmico  $M_0$  y el radio de fractura (R):

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \left( \frac{M_0}{R^3} \right) \quad (3.15)$$

El radio de fractura (R) puede ser relacionado con la frecuencia esquina ( $f_c$ ) por la relación propuesta por [Madariaga \(1976\)](#). El autor asume que la velocidad de ruptura es el 90% de la velocidad de las ondas sísmicas:

$$f_c = \frac{k\beta}{R} \quad (3.16)$$

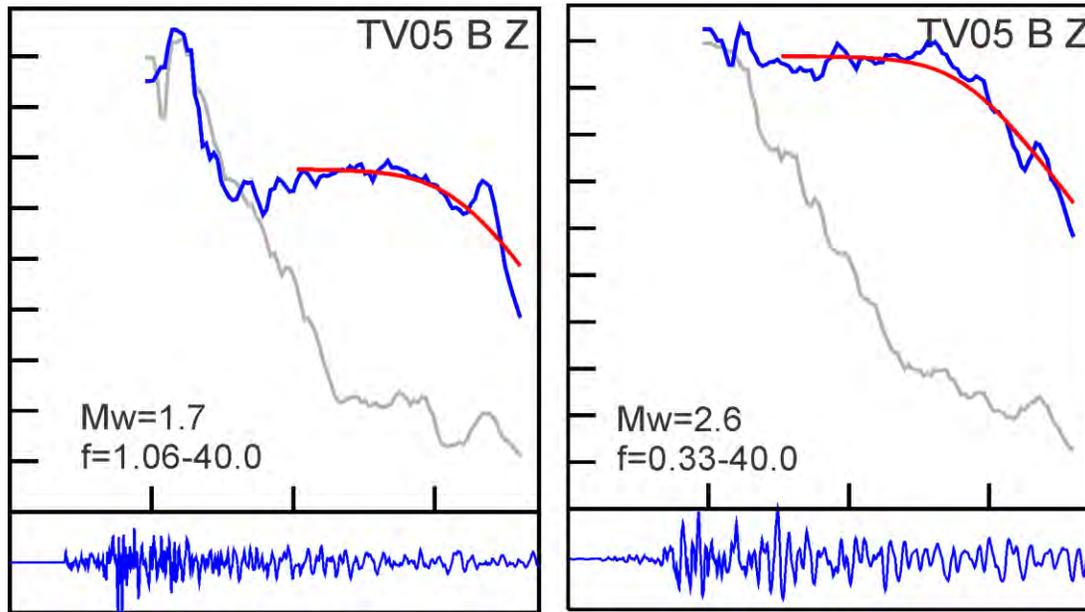
donde:  $k$  es una constante (0.32 para las ondas P y 0.21 para las ondas S),  $\beta$  es la velocidad de la onda S (m/s).

### 3.6.1 Parámetros de fuente en el CVGTV

Para estimar los parámetros de fuente de los 575 sismos localizados en el CVGTV, entre el periodo 2003-2013, se seleccionaron las formas de onda registradas en la componente vertical (Z) de cada una de las estaciones sísmicas que conformaron la Red Sísmica Temporal (RST) y Telemétrica (RST). Se seleccionó una ventana de tiempo entre 5 y 7 segundos del registro de la onda S y se calculó el espectro de desplazamiento de las señales sísmicas filtradas de 1 a 5 Hz y de 5 a 10 Hz, con un factor señal/ruido mayor a 3 ( $S/R > 3$ ). Para el análisis del espectro de frecuencias, se utilizaron los algoritmos *Spec* y *Getstressdrop* que forman parte del programa de procesamiento SEISAN v. 10.3 ([Otemöller et al., 2015](#)). Ambos algoritmos tienen como datos de entrada:

- Las estaciones sísmicas con corrección instrumental
- La velocidad promedio de la onda S ( $\beta=2.04$ ), obtenida del modelo de velocidad del campo geotérmico
- Una densidad promedio ( $\rho=2.9 \text{ gr/cm}^3$ )
- El factor de atenuación  $Q=29.6$  y el parámetro de decaimiento espectral  $\kappa=0.04$

Con los espectros de frecuencia y las ecuaciones propuestas por Brune (1970), Hanks y Kanamori (1979), Eshelby (1957) y Madariaga (1976) se calcularon: el momento sísmico ( $M_0$ ) en newtons-metro (N-m), el radio de fractura ( $R$ ) en metros (m), la caída de esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) en megapascales (MPa), la magnitud de momento ( $M_w$ ) en grados y la frecuencia esquina ( $F_0$ ) en Hertz (Hz). En la Figura 3.23 se presenta dos ejemplos de la estimación de estos parámetros.

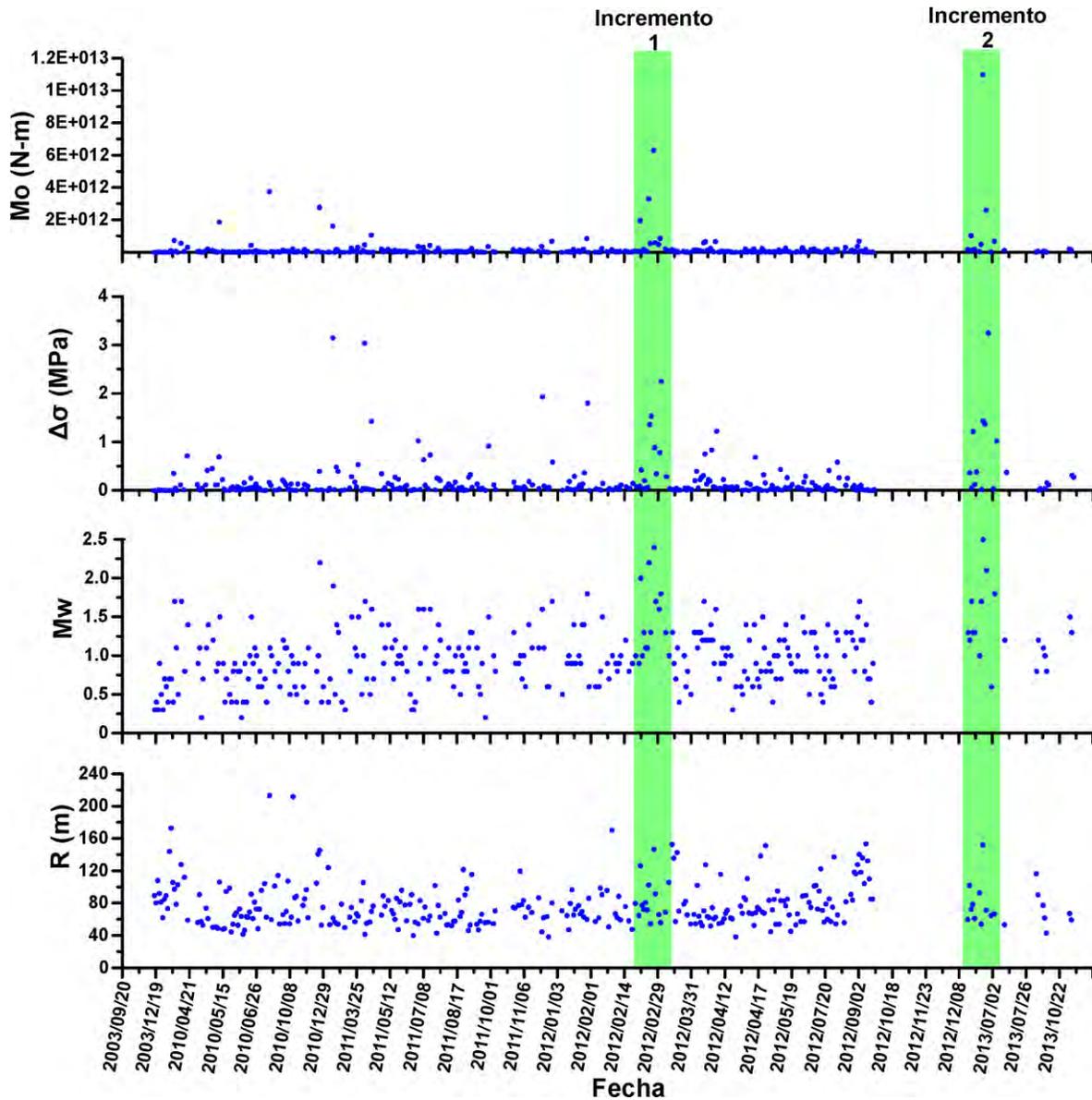


**Figura 3.23.** Ejemplos de la estimación de los parámetros de fuente en la componente vertical de la estación sísmica TV05. En la parte inferior de ambas figuras se muestran las señales sísmicas. En la parte superior y en color azul el espectro de desplazamiento de las ondas S, en color plomo el espectro del ruido y en color rojo la estimación de la frecuencia esquina.  $f$  = frecuencia en Hertz,  $M_w$  = magnitud de momento. TV05 es la estación sísmica. B= banda ancha, Z= componente vertical.

En la Figura 3.24 se presenta la variación temporal de los parámetros fuente estimados para 294 sismos (Anexo 2) (de un total de 575, Anexo 1). En general, los resultados muestran que los valores del momento sísmico ( $M_0$ ) varían entre  $2.4E+9$  y  $1.3E+13$  N-m, con un valor máximo de  $1.1E+13$  N-m 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 las estimadas con la magnitud de coda ( $M_c$ ). Con respecto al radio de ruptura  $R$ , 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 (Anexo 1: sismos N° 205-330, 515-518) se presentaron incrementos importantes en los valores de los parámetros de fuente. El primero corresponde a los **enjambres** de sismos 6 y 7 (Figuras 3.10a y 3.10b) registrados después de la ocurrencia de los 2 sismos regionales con magnitudes de 6.0 y 6.8 (12 de abril de 2012) 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.



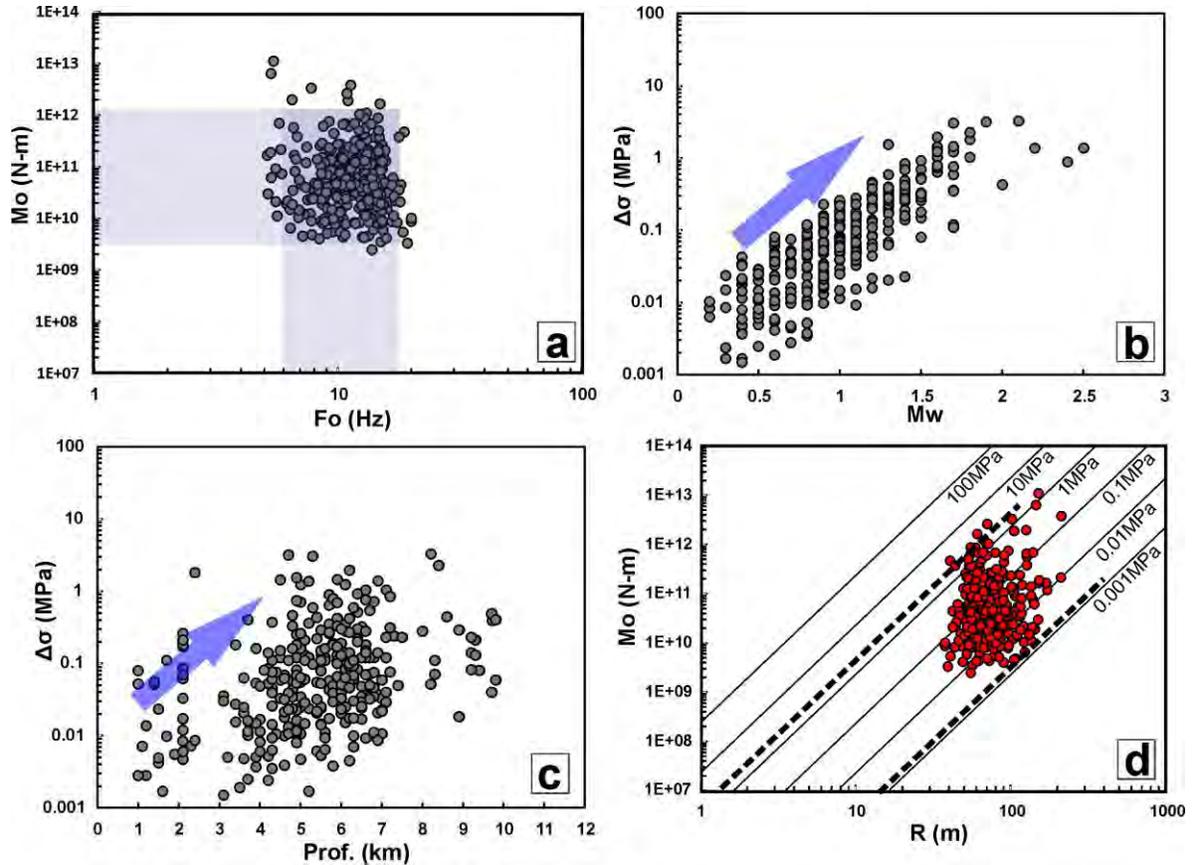
**Figura 3.24.** Evolución temporal de los parámetros de fuente de 294 sismos. Los recuadros en color verde muestran los periodos de incrementos de estos parámetros.  $M_o$ =momento sísmico en Newtons-metro (N-m);  $M_w$ =magnitud de momento en grados;  $\Delta\sigma$ =caída de esfuerzo en Megapascales (MPa) y  $R$ =radio de fractura en metros (m).

### 3.6.2 Análisis de los parámetros de fuente

La relación entre  $M_0$  y  $F_0$  es presentada en la [Figura 3.25a](#). Los resultados no muestran una correlación directa entre incrementos de  $M_0$  y disminución de  $F_0$ ; en contraste, se presentan amplios rangos de valores para  $F_0$  (7 y 17 Hz) con un promedio de 13 Hz; mientras tanto, el  $M_0$  varía entre  $4.3E+09$  y  $5E+11$  N-m. Estos valores son significativamente más pequeños, comparados con los estimados por [Mukuhira et al. \(2013\)](#) en el campo geotérmico de Basel (Suiza).

De la caída de esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) y magnitud de momento ( $M_w$ ) ([Figura 3.25b](#)), los resultados muestran una relativa correlación entre ellos, donde los incrementos de  $M_0$  reflejan incrementos en  $M_w$ . La relación de caída de esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) y la profundidad de los hipocentros ([Figura 3.25c](#)), también muestra un aparente incremento de  $\Delta\sigma$  con la profundidad, donde los sismos más superficiales exhiben valores menores a  $0.1$  MPa; mientras que los eventos más profundos oscilan entre  $0.01$  y  $1.0$  MPa. Estos resultados concuerdan con los estudios de [Kwiatek et al. \(2010\)](#), [Allmann y Shearer \(2009\)](#), [Jones y Helmberger \(1996\)](#), [Venkataraman y Kanamori \(2004\)](#) y [Del Pezzo et al. \(2004\)](#) ([Tabla 3.8](#)). Es preciso señalar que [Del Pezzo et al. \(2004\)](#) hicieron una evaluación completa de la correlación de  $\Delta\sigma$  y la profundidad de los sismos registrados en el volcán Vesubio (Italia). Sus resultados mostraron que los altos valores de  $\Delta\sigma$  (entre  $1.0$  y  $10$  MPa) correspondían a sismos de mayor magnitud, localizados a mayor profundidad, y los sismos superficiales de menor magnitud correspondían con valores bajos de  $\Delta\sigma$  ( $<1.0$  MPa).

Por otro lado, la relación entre  $M_0$  y el radio de fractura (R) ([Figura 3.25d](#)), considerando líneas diagonales de caídas de esfuerzo constantes entre 0.001 y 100 MPa, muestran que la  $\Delta\sigma$  varía en 3 órdenes de magnitud (entre  $0.0015$  y  $3.16$  MPa), y es evidente que la dimensión de la fuente, no sigue el patrón de la caída de esfuerzo constante. Similares resultados fueron evidenciados por [Kwiatek et al. \(2010\)](#), [Del Pezzo et al. \(2004\)](#) y [Goertz-Allmann et al. \(2011\)](#) en el campo geotermal Groß Schönebeck (Alemania), en el volcán Vesubio (Italia) y en el campo geotérmico de Basel (Suiza) respectivamente. Por lo tanto, contravienen a las hipótesis iniciales de la ley de escalamiento del espectro sísmico. Sin embargo, esto es explicable debido a que en el análisis de parámetros de fuente se involucran sismos “pequeños” con magnitudes menores a 2.5 Mc los cuales dificultarían el cálculo de la frecuencia esquina, a estos se suman las dificultades para corregir los efectos de atenuación y/o efectos de sitio ([Anderson, 1997](#); [Abercrombie, 1995](#); [Ide et al., 2003](#)).



**Figura 3.25.** Correlación de parámetros de fuente de 294 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 de acuerdo al 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 hipocentros.

### 3.6.3 Parámetros de fuente por zonas sísmicas

Los resultados del análisis de los parámetros de fuente para los 294 sismos registrados en el CVGTV, mostraron la no linealidad de la ley de escalamiento del espectro sísmico ( $M_o$  y  $F_o$ ), pero si se evidenciaron que la  $\Delta\sigma$  versus  $M_w$  y  $\Delta\sigma$  versus profundidad de los hipocentros, presentan una estrecha correlación. En este contexto, estos parámetros también son analizados por zonas (A, B, C y D), siguiendo la distribución de los sismos en el CVGTV.

**Tabla. 3.8.** Correlación de los parámetros de fuente obtenidos en este estudio y por otros autores en zonas volcánicas, geotérmicas y mineras.

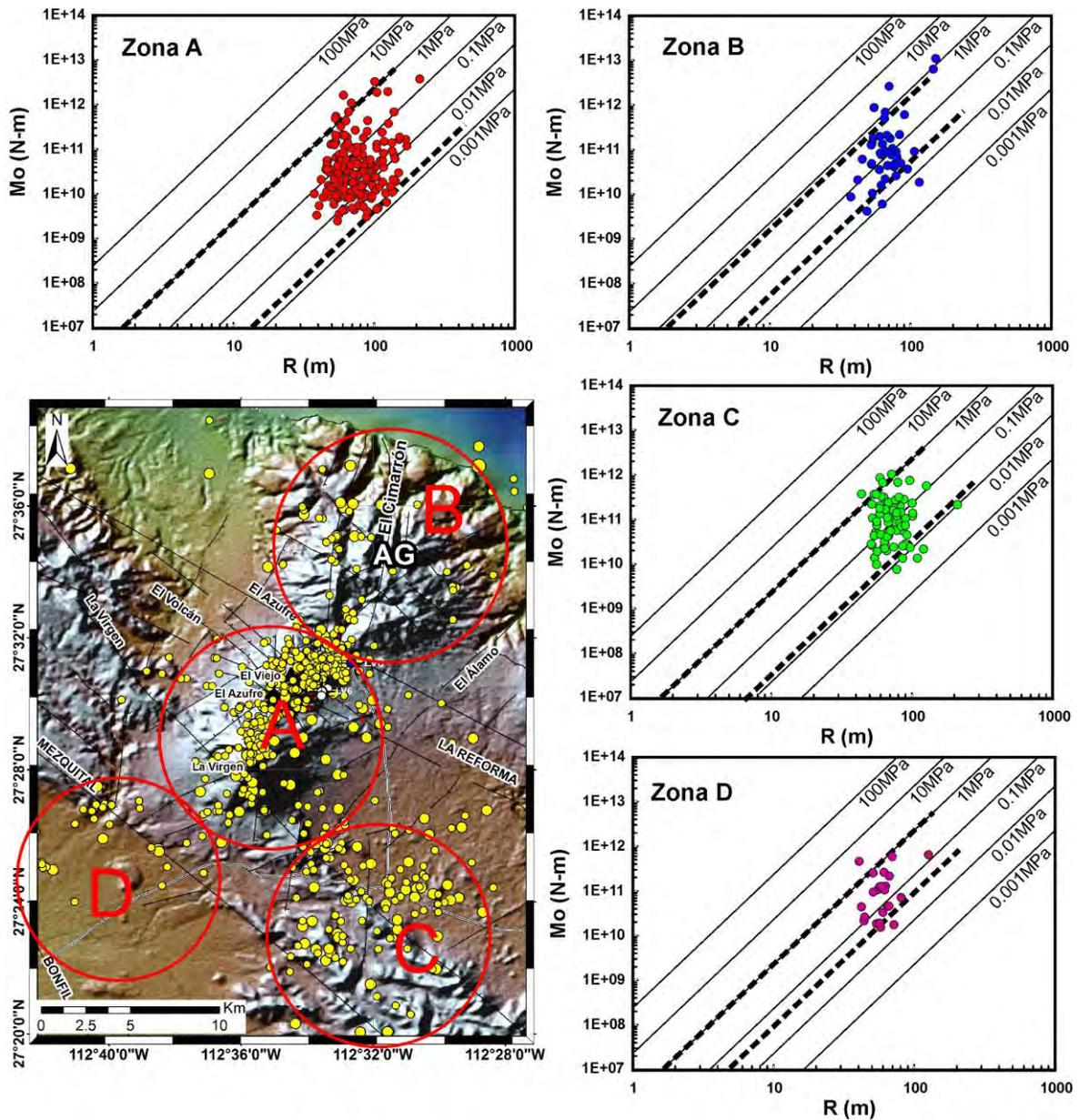
Estudios	Mo (N-m)	$\Delta\sigma$ (MPa)	Mw	Zona
Este estudio	2.4E+9 - 6.3E+12	0.0015 - 3.16	0.2 - 2.4	CVGTV
Mandal et al. (1998)	1E+11 - 1E+16	0.03 - 19.0	1.5- 4.7	Koyna (India)
Valdés (2009)		1 - 10		Los Azufres (México)
Del Pezzo et al. (2004)	1.1E+13	0.1 - 10.0	3.6 Md	Volcán Vesubio (Italia)
Allman and Shearer (2007)		1.0 - 40		
Yamada et al. (2007)		3.2 - 88	0.0 - 1.3	Campo geotermal de Berlín (El Salvador)
Kwiatek et al. (2010)		0.04 - 1.21		Campo geotermal Groß Schönebeck (Alemania)
Goertz-Allmann (2011)		0.01 - 0.1		Campo geotermal Basel (Suiza)
Mukuhira et al. (2013)		0.01 - 0.5		Campo geotermal Basel (Suiza)
Kwiatek et al. (2014)		0.1 - 100		Mina de oro Mponeng (Sudáfrica)

Los resultados que se muestran en la [Figura 3.26](#), siguen la misma tendencia de no linealidad evidenciada en la [Figura 3.25](#). Aun así, se observa que los eventos de la Zona A, ocupan un rango de valores de  $\Delta\sigma$  entre  $0.001$  y  $1$  MPa, con respecto a los valores calculados en las zonas B, C y D ( $\Delta\sigma$  entre  $0.01$  y  $1$  MPa) que conforman la periferie de la zona central (Zona A).

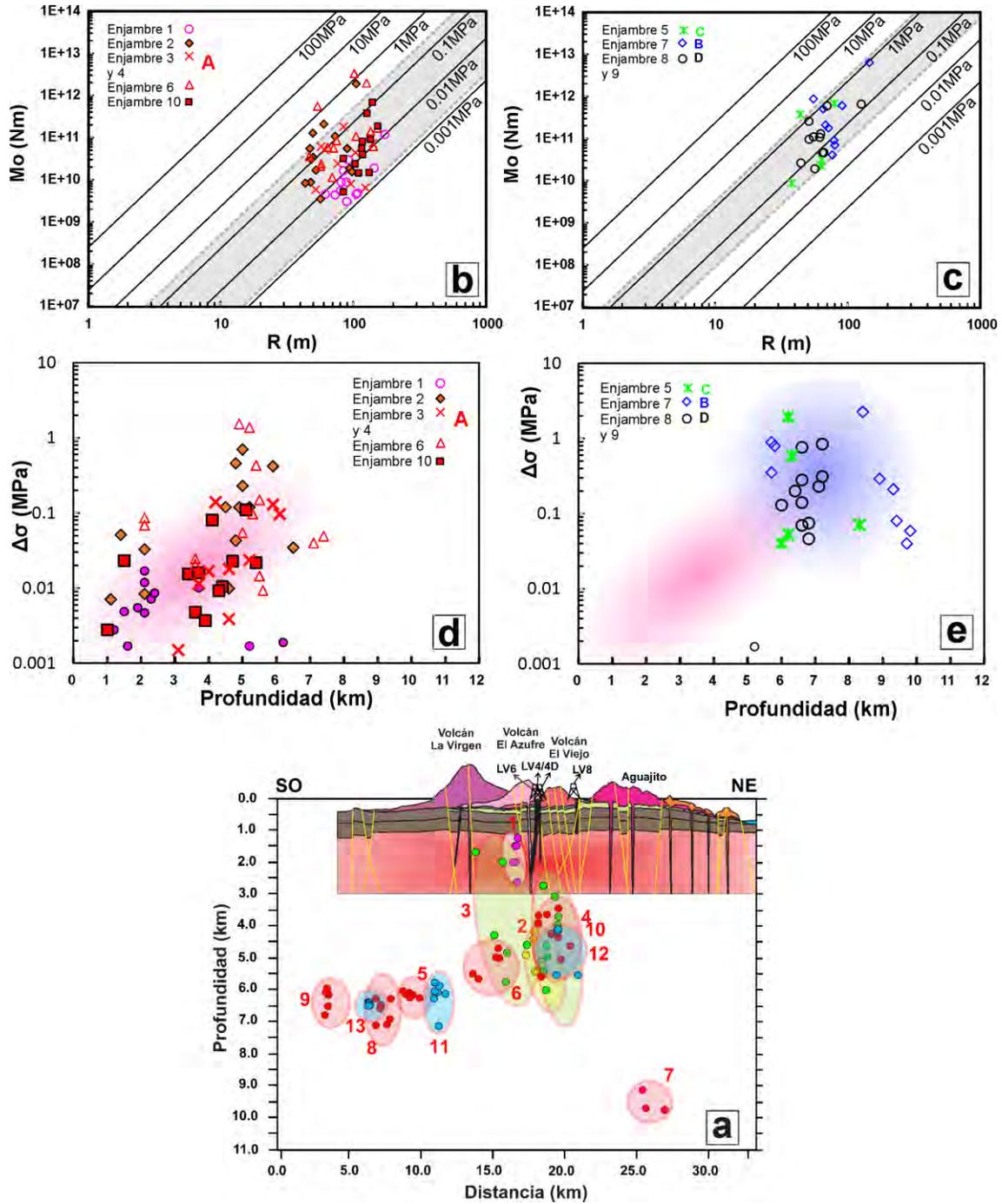
### 3.6.4 Parámetros de fuente de los enjambres sísmicos

Con relación a los parámetros de fuente de 10 de los 13 enjambres identificados en el CVGTV ([Figura 3.27a](#)), 6 de ellos ocurrieron en la zona central A y los otros 4 restantes en las zonas B, C y D. Los resultados de la relación del patrón de la caída de esfuerzo estático entre los enjambres de la Zona A ([Figura 3.27b](#)) y de las Zonas B, C y D ([Figura 3.27c](#)) mostraron una ligera linealidad, sin embargo al analizarlos estadísticamente, no reflejaron el patrón de caída de esfuerzo, pues presentaron valores de correlación muy bajos ( $R^2=0.02$ ).

En contraste a estos resultados, se evidencia la correlación de los incrementos de los valores de la caída de esfuerzo con la profundidad hipocentral ([Figura 3.27d](#) y [3.27e](#)). Ejemplos de ellos se reflejan en el análisis de los **enjambres 1** de la Zona A ([Figura 3.27a](#)) y los **enjambres 8 y 9** de la Zona D. El primer enjambre ocurrió a profundidades superficiales ( $<2.5$  km) y están asociados a las pruebas de inyección del pozo LV6 (ver [Figura 3.13](#)) y el segundo enjambre a profundidades mayores a 6 km, asociados a la tectónica local. Generalmente, los sismos que ocurren en los alrededores de la zona central (A) presentan mayor magnitud y ocurren a profundidades mayores a los 5 km. Obsérvese, también que los enjambres identificados en las zonas B, C y D presentan los valores más altos de  $\Delta\sigma$  y ocurrieron a mayor profundidad con respecto a los enjambres de la Zona A.



**Figura 3.26.** Correlación del momento sísmico y radio de fractura por zonas. a) Zona A, zona central de campo geotérmico; b) Zona B, caldera El Aguajito; c) Zona C, extremo sur del volcán La Virgen y la falla La Virgen; d) Zona D, entre los sistemas de fallas Bonfil y Mezquitil.



**Figura 3.27.** a) Ubicación de los enjambres sísmicos en profundidad. Correlación del momento sísmico y radio de fractura de los enjambres registrados en: b) la Zona A y (b) las Zonas B, C y D. La correlación de la caída de esfuerzo con profundidad son presentados también para: d) la zona A (zona central) y e) las Zonas B, C y D (zonas periféricas de la zona A). Las elipses y círculos en colores magenta (Zona A) y azul claro (B, C y D), representan los incrementos del momento sísmico con la profundidad.

Al comparar los resultados de la caída de esfuerzos calculados para el enjambre 1 y los calculados por [Mukuhira et al. \(2013\)](#) (Tabla 3.8) en el reservorio geotermal Basel se identificaron 2 características principales: 1) la sismicidad de ambos son *inducidos* por los procesos de inyección hidráulica y 2) no siguen el patrón de la caída de esfuerzo estático. Por lo tanto es factible encontrar estos valores *bajos* debido a que en las zonas volcánicas y geotérmicas están presentes los efectos de la circulación de fluidos, gases y altas temperaturas que pueden modificar, significativamente, el estado de esfuerzos de la zona de estudio.

Por el contrario, [Yamada et al. \(2007\)](#) y [Kwiatek et al. \(2014\)](#) obtuvieron valores de caída de esfuerzo entre *0.1 y 100 MPa*, en el campo geotérmico de Berlín (El Salvador) y la mina de oro Mponeng (Sudáfrica) respectivamente. Estos autores concluyen que la dinámica de ruptura de los sismos locales no se diferencian, significativamente, de los sismos regionales de magnitud mayor; por lo tanto, siguen el patrón de escalamiento.

### 3.7 TOMOGRAFÍA DEL VALOR *b*

El *valor b*, es un parámetro que permite cuantificar la distribución relativa del tamaño de los sismos y el estado de esfuerzo de la zona de estudio ([Wiemer y Wyss, 2002](#)). Su estimación se realiza con base en el concepto de auto-similitud de los sismos, definido en la relación [Gutenberg-Richter \(1944\)](#):

$$\text{Log}N = a - bM \quad (3.17)$$

donde: *N* es el número de eventos acumulados para un periodo de tiempo específico, *a* y *b* son constantes.

La constante *a* es una medida del nivel de sismicidad ([Kossoboko y Keilis-Borok, 2000](#)), *b* es el valor de la pendiente de la recta que mejor se ajusta a la parte lineal del logaritmo del número acumulado de sismos y su correspondiente magnitud (*M*); si la pendiente del ajuste es menor, indica que el número de sismos grandes es mayor, y por ende, la concentración de esfuerzos es mayor; si la pendiente es mayor, entonces el número de sismos de magnitud pequeña es mayor, y el estado de esfuerzos es menor ([Wiemer y McNutt, 1997](#); [Zúñiga y Wyss, 2001](#); [Wiemer y Wyss, 2002](#); [Sánchez et al., 2004](#)).

El *valor b* puede ser estimado, rápidamente, del ajuste lineal de la relación Gutenberg-Richter, mediante el método de Mínimos Cuadrados (MC) ([Guttorp, 1987](#)) y el método de Máxima Verosimilitud (MV) descrito, inicialmente, por [Aki \(1965\)](#) y modificado por [Utsu \(1965, 1984\)](#). Así,

$$b = \frac{\text{Log}(exp)}{M_{med} - M_{co}} \quad (3.18)$$

donde:  $b$  es el *valor b*,  $Med$  es la magnitud media y  $Mco$  la magnitud de completitud.

La desviación estándar del *valor b* ( $\sigma_b$ ) está dada por la ecuación de Aki (1965) y modificado por Shi y Bolt (1982)

$$\sigma_b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum(Mi - [Mmed])^2}{N(N-1)}} \quad (3.19)$$

donde:  $N$  es el número de eventos y  $Mmed$  la magnitud media.

Sin embargo, la estimación del *valor b*, depende, básicamente, de la estimación de la magnitud de completitud ( $Mco$ ) (Zúñiga y Wyss, 2001); es decir, de la magnitud más baja a partir de la cual el 100 % de eventos son detectados en espacio y tiempo (Woessner y Wiemer, 2005). Existen diferentes métodos para estimar  $Mco$ ; entre ellos destacan: Máxima Curvatura (MAXC) y Mejor Combinación (MC) (Wiemer y Wyss, 2000). La primera (MAXC), permite obtener  $Mco$ , a partir de la máxima curvatura de la distribución frecuencia-magnitud; mientras que la segunda (MC), correlaciona el método de Máxima Curvatura (MAXC) y construye intervalos de confianza del 90 y 95 % para garantizar sesgos mínimos en el cálculo de la  $Mco$ .

Cuantitativamente, el *valor b* próximo a 1.0 ( $b \sim 1$ ) está asociado a procesos tectónicos e indica zonas de corteza homogénea y alto esfuerzo aplicado. Sin embargo, en ambientes volcánicos y geotérmicos estos valores son mayores a 1, inclusive cercanos a 2 ( $b \sim 2$ ). Estos *valores b anómalos* han sido atribuidos a la heterogeneidad del medio (Mogi, 1963), disminución del estado de esfuerzo efectivo (alta presión de poro) (Wyss, 1973; Pearson, 1981), elevados gradientes térmicos (Warren y Latham, 1970), alto grado de fracturamiento (McNutt, 2005), cambios en el nivel de fluidos (Wiemer y McNutt, 1997; Wyss et al., 2001; Sánchez et al., 2004; Legrand et al., 2011; Viegas y Hutchings, 2011), incluso con enfriamientos del cuerpo de magma (Zollo et al., 2002), permeabilidad del yacimiento (Majer et al., 2007), procesos de inyección de agua en el yacimiento geotérmico (Wyss, 1973; Cornet et al., 1997; Dorbath et al., 2009; Maxwell et al., 2009; Viegas y Hutchings, 2011; Bachman et al., 2012), cambios bruscos de esfuerzo después de la ocurrencia de un sismo de mayor magnitud (Del Pezzo et al., 2004). También, por la ocurrencia de enjambres (Mogi, 1963; Fischer y Horálek, 2005). Cuando estos enjambres sísmicos son de origen tectónico presentan *valores b* entre 0.6 y 1.0; mientras que los de origen geotérmico, volcánico, inclusive la combinación de ambos y la tectónica, donde el fluido está involucrado (Neunhöfer y Hemmann, 2005; Dorbath et al., 2009; Farrel et al., 2009), se caracterizan por presentar *valores b* > 1, pueden sobrepasar los 2.5 ( $b > 2.5$ ) (Stein y Wyssession, 2003) o presentar dos *valores b* en el análisis de la distribución frecuencia-magnitud (Legrand et al., 2011; Viegas y Hutching, 2011; Kundu et al., 2012; Legrand et al., 2014).

En este estudio se evalúa y analiza el *valor b*, a fin de identificar valores anómalos que pueden estar asociados a alguno de los procesos antes mencionados, dado que el CVGTV, presenta una marcada heterogeneidad geológica y tectónica, presencia de movimiento de

fluidos, gradientes térmicos variables y la ocurrencia continua de enjambres sísmicos asociados, mayormente, al proceso de inyección de agua al yacimiento geotérmico, tal como se describió en la sección 3.2.

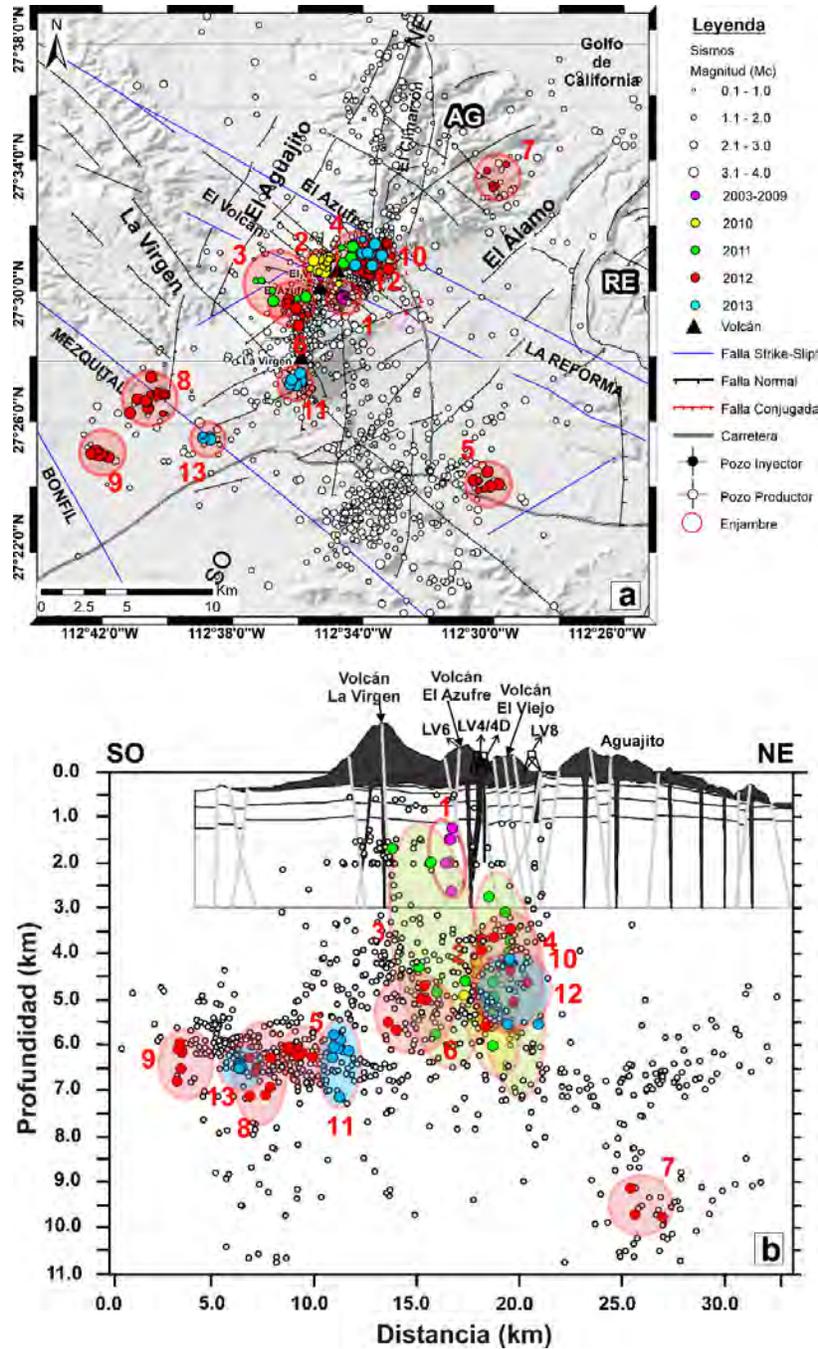
### 3.7.1 *Valor b* en el CVGTV

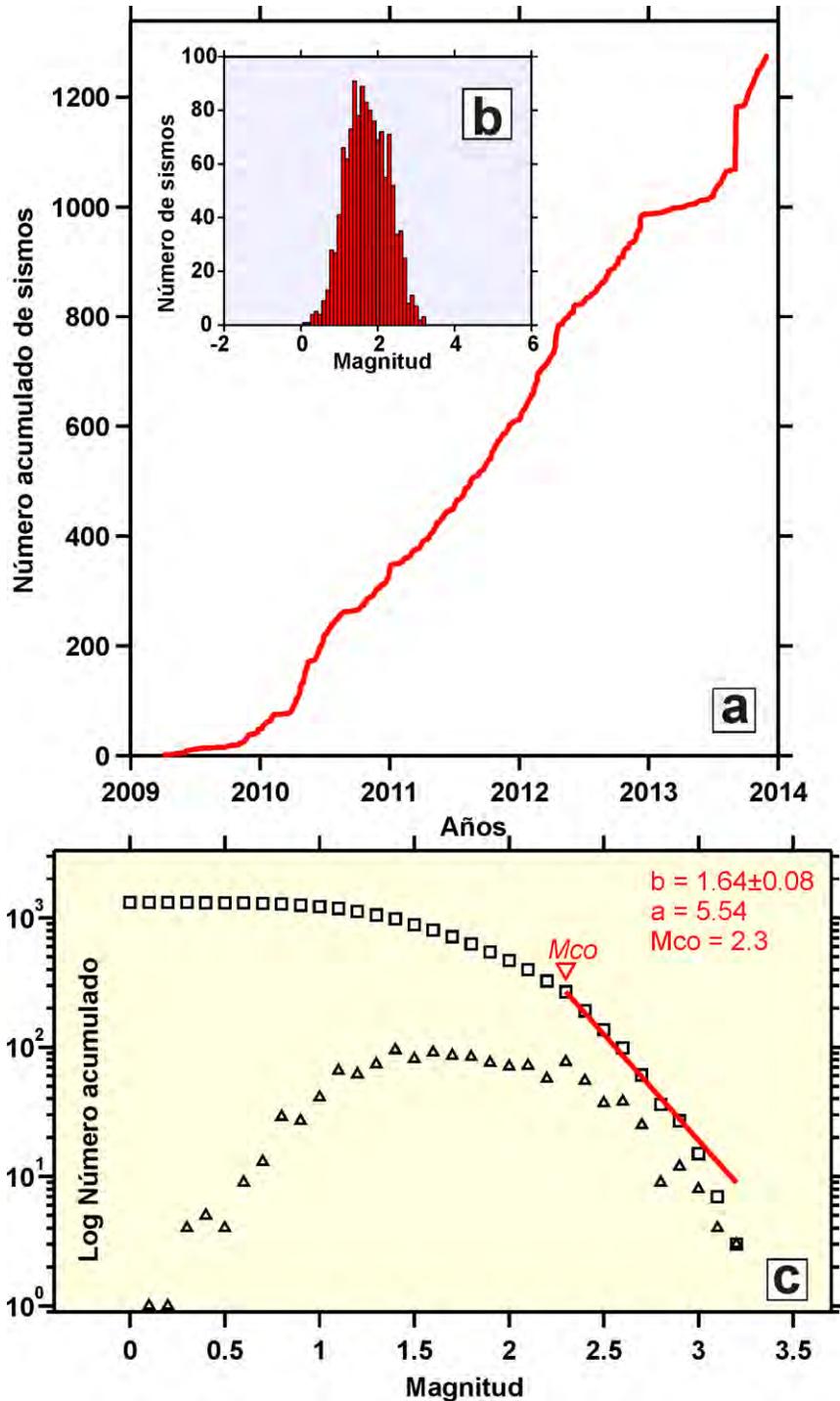
Para estimar del *valor b* en el CVGTV, se utilizó la información sísmica registrada entre el periodo 2009-2013; en este caso particular, y con el propósito de construir una base de datos con el mayor número de sismos, se consideró incluir los sismos localizados con 3 a más estaciones y con errores de localización menores a 4 km para aquellos sismos ubicados en los alrededores del campo geotérmico. Así, con los 575 sismos seleccionados previamente y los incluidos, exclusivamente, para la estimación del *valor b*, se dispuso de un catálogo sísmico de 1275 sismos, con magnitudes de coda entre 0.1 y 3.2 Mc (Figura 3.28a) y profundidades focales entre 0.3 y 11 km (Figura 3.28b).

Para la estimación del *valor b* promedio y por consiguiente la magnitud de completitud ( $M_{co}$ ), se hizo uso del programa ZMAP (Wyss et al., 2001) y los métodos de Máxima Verosimilitud (MV) descrito por Utsu (1984) y Mejor Combinación (MC) de (Wiemer y Wyss, 2000); así como una desviación estándar del *valor b* menor o igual a 0.3 ( $\sigma_b \leq 0.3$ ). La selección de ambos métodos (MV y MC) se debe a que algunos autores (Wiemer y Wyss, 2000; Woessner y Wiemer, 2005; Sandri y Marzocchi, 2006), observaron menos sesgos en la estimación del *valor b*, especialmente, cuando la distribución frecuencia-magnitud presenta una curvatura gradual que podrían estar correlacionadas a las variaciones espaciales y/o temporales de las magnitudes.

Con base en estos principios, en la Figura 3.29a se muestra el número acumulado de sismos como una función del tiempo en años (periodo 2009 y 2013), donde la tendencia general sugiere un incremento exponencial, con algunos picos que podrían estar atribuidos a algunos enjambres sísmicos que ocurren, con relativa frecuencia, en el CVGTV. En la Figura 3.29b, se presenta el histograma del número de sismos versus la magnitud de coda (Mc), donde se observa que muchos de los sismos del CVGTV ocurren en el rango de magnitud entre 1.2 y 2.4. Mientras tanto, en la Figura 3.29c se presenta la distribución frecuencia-magnitud de la relación de Gutenberg-Richter con la estimación del *valor b*, la magnitud de completitud  $M_{co}$  y la constante  $a$ . Así, el *valor b* promedio ha sido estimado en  $1.64 \pm 0.08$  ( $b = 1.64 \pm 0.08$ ) y la magnitud de completitud  $M_{co} = 2.3$ . Este *valor b*  $> 1$  y cercano a 2, sugiere, *a priori*, un *valor b* “anómalo” comparables a los obtenidos en zonas de corteza heterogénea y bajo esfuerzo efectivo aplicado (Wyss, 1973; Pearson, 1981); zonas geotérmicas como Los Azufres (Valdés, 2009), Geysers (Estados Unidos) (Bachmann et al., 2011), Coso (Estados Unidos) (Kaven et al., 2012), Soultz-sous-Forêts (Francia) (Dorbath et al., 2009; Cuenot et al., 2008) y Basel (Suiza) (Bachmann et al., 2012), con variaciones del *valor b* entre 1.2-1.27, 1.27-1.57, 1.75-2.4, 1.23-0.94 y 1.0-2.0, asociados a la interacción roca-fluido e inyección de fluidos; asimismo en volcanes como el de Santa Elena (Estados Unidos) (Wiemer, 2011), Etna (Italia) (Murru et al., 1999), Galeras

(Colombia) (Sánchez et al., 2005), Yellowstone (Estados Unidos) (Farrell et al., 2009) y el Popocatepetl (Garza, 2014), con valores  $b$  de 0.96, 1.15, 0.6-1.5 y 1.9, la mayoría de ellos asociados a posibles cámaras magmáticas.





**Figura 3.29.** a) Número acumulado de sismos con magnitudes  $M_c$  entre 0.1 y 3.2 como una función del tiempo en años (periodo 2009 y 2013) registrados en el CVGTV. b) Histograma del número de sismos versus la magnitud de coda. c) Estimación del *valor b* promedio para el total de sismos (1275). La línea roja continua muestra el ajuste del acumulado de sismos versus la magnitud. Los triángulos representan la relación frecuencia de sismos no acumulada y la magnitud.

### 3.7.2 Valor $b$ por zonas sísmicas

Como el valor  $b=1.64\pm 0.08$  corresponde al promedio total del CVGTV, también se estimaron para cada una de las zonas sísmicas especificadas en la sub-sección 3.1.2. Los resultados de los valores  $b$  presentados en la Tabla 3.9 y Figura 3.30 muestran las pendientes de las rectas que mejor ajustan a la parte lineal del logaritmo del número acumulado de sismos y sus correspondientes magnitudes de completitud ( $M_{co}$ ). De acuerdo a estos resultados, los ajustes con mayor pendiente y por lo tanto valores  $b$  altos o anómalos corresponden a las zonas A ( $b=2.07\pm 0.2$ ), B ( $b=1.73\pm 0.04$ ) y C ( $b=2.05\pm 0.09$ ), mientras tanto los ajustes con menor pendiente y valor  $b$  bajo a la zona D ( $b=1.036\pm 0.06$ ).

Estudio	Valor $b$	$a$	$M_{co}$
CVGTV	<b><math>1.64\pm 0.08</math></b>	<b>5.54</b>	<b>2.3</b>
Zona A	$2.07\pm 0.2$	6.52	2.3
Zona B	$1.73\pm 0.04$	2.81	2.2
Zona C	$2.05\pm 0.09$	3.05	2.3
Zona D	$1.036\pm 0.06$	3.2	1.7

**Tabla 3.9.** Valor  $b$  y su respectiva desviación estándar, la constante  $a$  y la magnitud de completitud  $M_{co}$  estimadas para todo el CVGTV y las zonas A, B, C y D.

De los valores  $b$  estimados en las 4 zonas se observan, claramente, que las zonas central (Zona A), noreste (Zona B) y extremo sur del sistema de fallas La Virgen (Zona C) sobrepasan largamente el valor  $b$  normal ( $b\sim 1$ ).

De acuerdo a la descripción de cada zona (ver Figura 3.7), las zonas A, B y C se caracterizan por presentar alta heterogeneidad geológica y sismotectónica, en particular la Zona A, donde se ubica el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) además de la alta heterogeneidad tectónica regional y local y las operaciones propias de un campo geotérmico. A estos procesos se agregan, también, la ocurrencia de enjambres, 6 de ellos estrechamente correlacionados a la inyección de agua al yacimiento geotérmico (ver Figura 3.13) y 7 a la tectónica regional y local lo que explicarían bien estos valores  $b$  anómalos. En cuanto a la Zona B, el valor  $b$  de 1.73 podría estar asociado a la interacción de fluidos en las zonas de alto fracturamiento y altas temperaturas entre 90 y 250 °C (Hernández et al., 2010; Macías et al., 2011) a lo largo de los sistemas de fallas El Azufre y La Reforma. Con relación a la zona D, aunque la sismicidad empleada para su análisis es menos representativa con respecto a las otras zonas, el ajuste del valor  $b$  de 1.036 estaría correlacionado a la tectónica de la zona (Figura 3.30).

Respecto al nivel de sismicidad en estas zonas, representada por la constante  $a$ , se puede observar que el valor de 6.52 corresponde a la Zona A, sugiriendo niveles más altos con relación a las zonas B (2.81), C (3.05) y D (3.2) respectivamente.

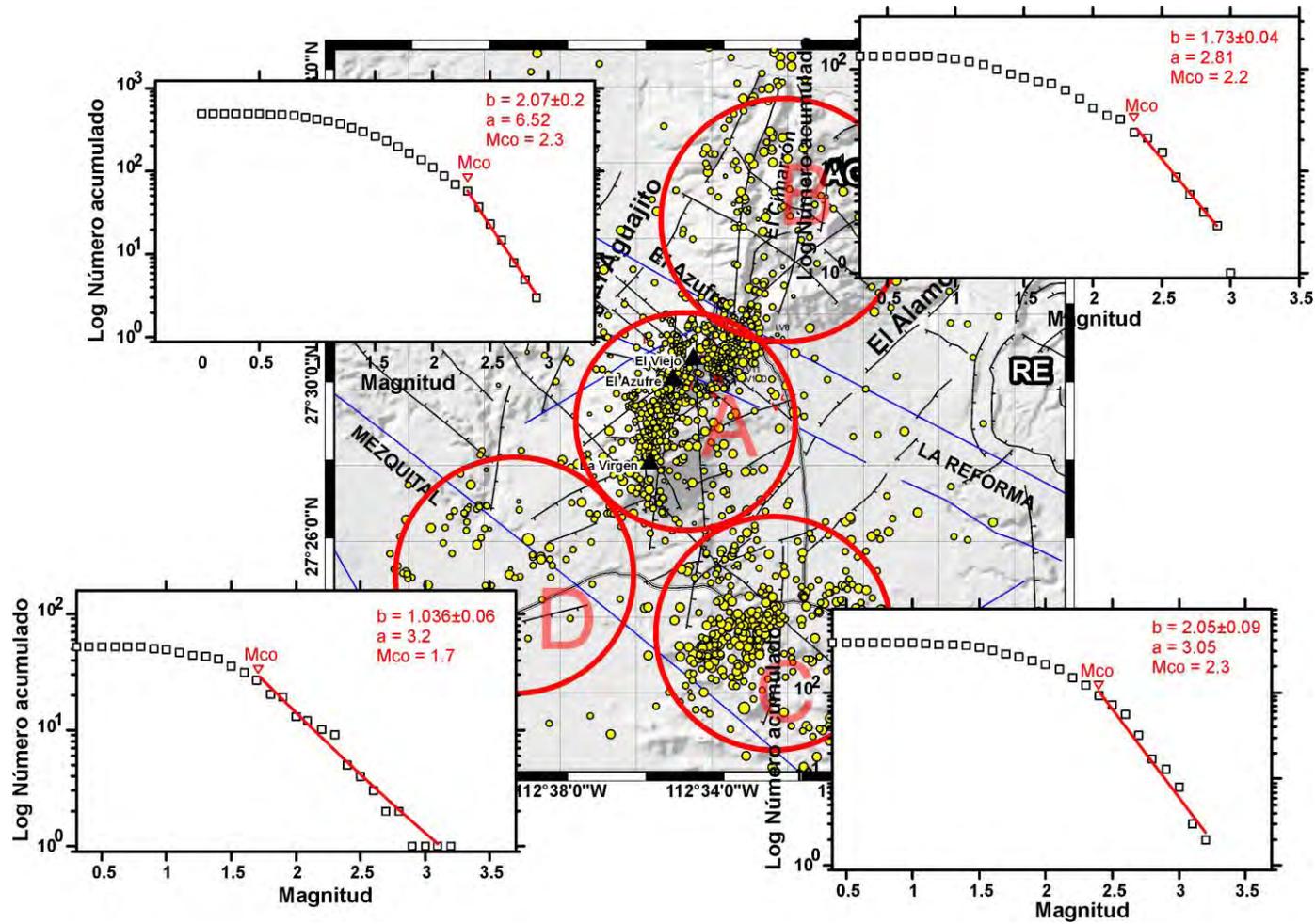


Figura 3.30. Estimación del valor  $b$  promedio para cada una de las zonas sísmicas. Obsérvese que los valores  $b$  anómalos corresponden a las zonas A y C (ver Figura 3.29).

### 3.7.3 Valor *b* por profundidad

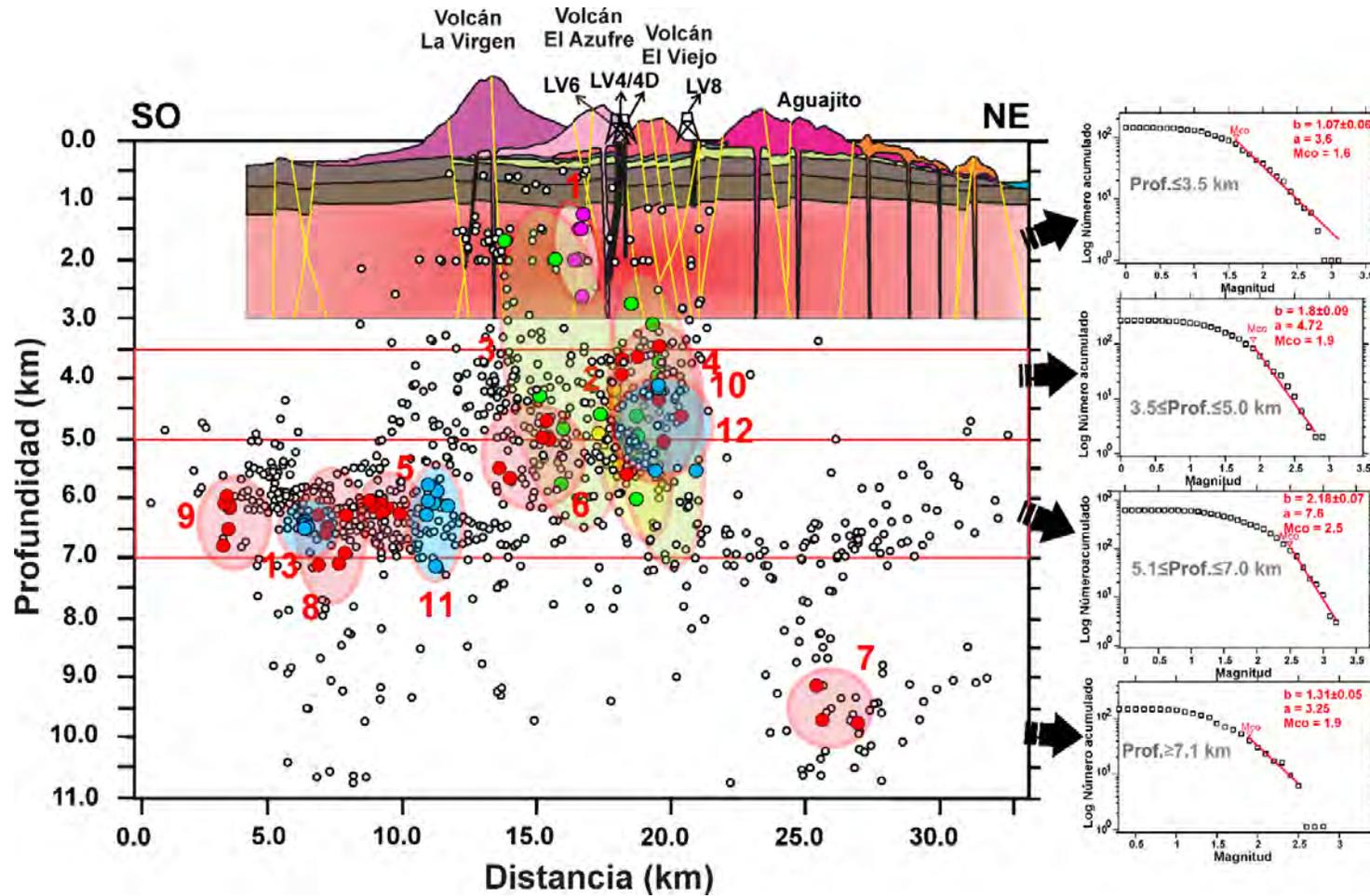
Para estimar el *valor b* en profundidad, se consideraron 4 rangos de profundidad representativos, así como la respectiva distribución hipocentral de los sismos y enjambres identificados, siguiendo la orientación SO-NE del perfil estratigráfico de Benton et al. (2011). Estos rangos de profundidades son: la primera, a profundidades menores a 3.5 km ( $\text{Prof.} \leq 3.5$  km); la segunda, entre 3.6 y 5.0 km ( $3.6 \leq \text{Prof.} \leq 5.0$  km); la tercera, entre 5.1 y 7.0 km ( $5.1 \leq \text{Prof.} \leq 7.0$  km) y la cuarta, a profundidades mayores a 7.1 km ( $\text{Prof.} \geq 7.1$  km).

Los resultados mostrados en la Tabla 3.10 y Figura 3.31 permitieron identificar que los valores *b* anómalos de  $1.8 \pm 0.09$  y  $2.18 \pm 0.07$  se concentran a profundidades entre 3.6 y 7.0 km; mientras que, a profundidades menores a 3.5 km y mayores a 7.1 km, los valores *b* de  $1.07 \pm 0.06$  y  $1.31 \pm 0.05$  tienden a ser normales. Asimismo, los valores altos de *a* (7.6 y 4.72) corresponden a las profundidades entre 3.6 y 7.0 km y los valores bajos de 3.6 y 3.25 a las profundidades menores a 3.5 km y mayores a 7.1 km respectivamente.

Prof. (km)	Valor <i>b</i>	<i>a</i>	Mco
Prof. $\leq 3.5$ km	$1.07 \pm 0.06$	3.6	1.6
$3.6 \leq \text{Prof.} \leq 5.0$ km	$1.8 \pm 0.09$	4.72	1.9
$5.1 \leq \text{Prof.} \leq 7.0$ km	$2.18 \pm 0.07$	7.6	2.5
Prof. $\geq 7.1$ km	$1.31 \pm 0.05$	3.25	1.9

**Tabla 3.10.** Estimación del *valor b*, la constante *a* y la magnitud de completitud (*Mco*) por profundidad.

Analizando la perturbación del *valor b* entre los 3.6 y 7.0 km y la estratigrafía del CVGTV representada en el perfil SO-NE de Benton et al. (2011), estos valores parecen estar correlacionados con la permeabilidad de la zona, pues de acuerdo a Majer et al. (2007), existe una correlación inversa entre la permeabilidad del yacimiento y los valores *b*. Cuando la permeabilidad es baja, los valores *b* son altos ( $b > 1.3$ ); por el contrario, si la permeabilidad del yacimiento es alta, los valores *b* son bajos ( $0.6 \leq b \leq 1.3$ ). En este contexto, el *valor b* =  $1.07 \pm 0.06$ , podría estar asociado a la zona de alta permeabilidad observada a profundidades entre 1.5 y 2.5 km, (Hernández et al., 2010; Macías et al. 2011). En cuanto los valores *b* de  $1.8 \pm 0.09$  y  $2.18 \pm 0.07$ , estimados a profundidades entre 3.6 y 7.0 km, si bien los estudios de estratigrafía del CVGTV no describen a profundidades superiores a los 2.5 km, es posible inferir que la permeabilidad a estos niveles de profundidad deben de ser menores y que la intensa sismicidad y enjambres sísmicos registrados estarían asociados a la combinación de procesos tectónicos y geotérmicos; es decir a la interacción roca-fluido (Wyss, 1973).



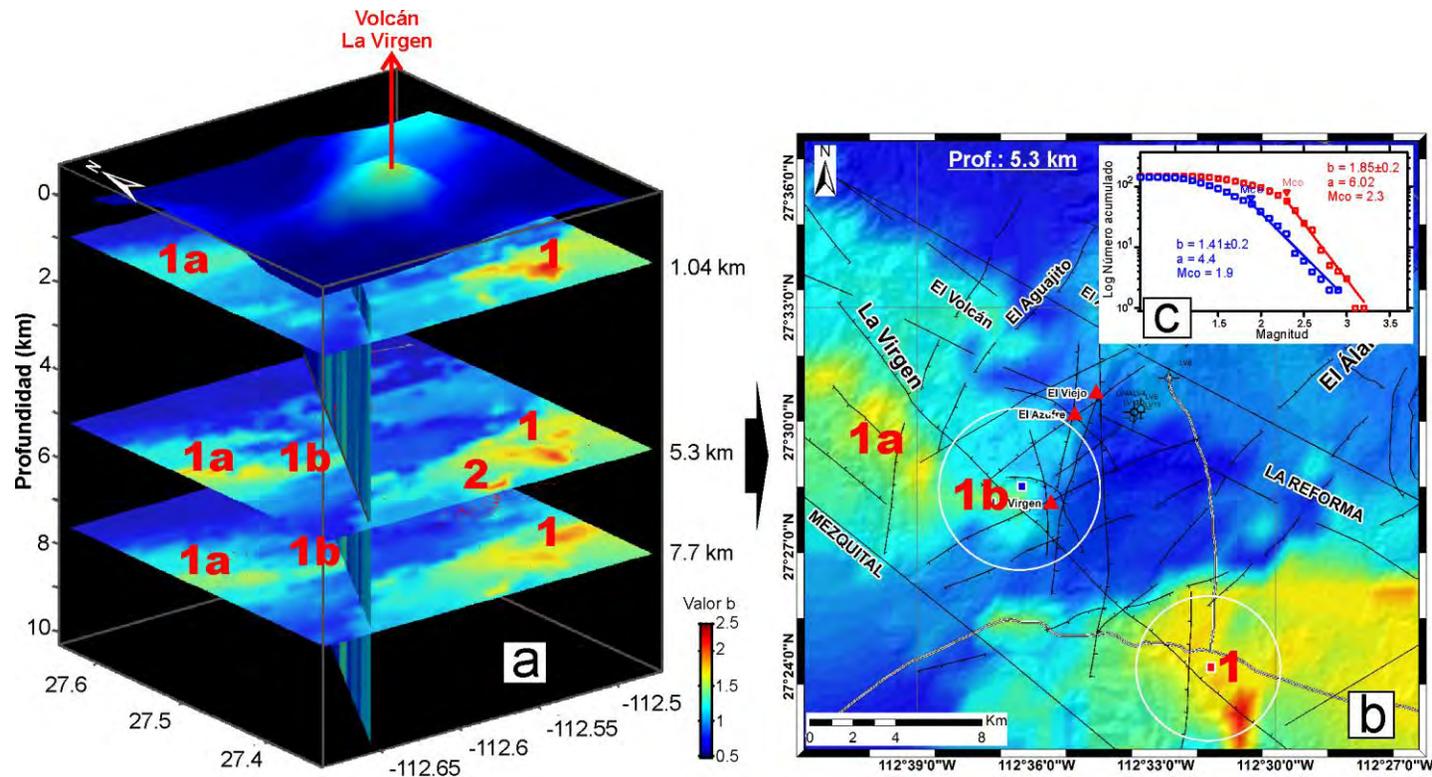
**Figura 3.31.** Perfil estratigráfico en dirección SO-NE (modificado de Benton et al., 2011) y distribución de la sismicidad en el CVGTV donde se muestra la estimación de los valores  $b$ ,  $a$  y  $M_{co}$  para 4 profundidades (Prof.). Los círculos y elipses muestran la ubicación de los enjambres identificados entre el periodo 2003-2013 (ver Figuras 3.12 y 3.29).

### 3.7.4 Tomografía pseudo 3D del *valor b* y correlación con la tectónica del CVGTV

Para obtener la tomografía pseudo 3D del *valor b* se eligió una malla tridimensional (3D) de  $0.4 \times 0.4 \times 5$  km y se fijó el número máximo de eventos en 150 y el mínimo en 25. Similar a las estimaciones realizadas del *valor b* promedio, por zonas y en profundidad, para la tomografía se consideró utilizar los métodos de Máxima Verosimilitud y Mejor Combinación y una máxima desviación estándar de 0.3. Los resultados son mostrados en diferentes mapas de distribuciones de *valores b* a diferentes profundidades, perfiles paralelos y perpendiculares a los sistemas de fallas regionales y locales, además de diferentes presentaciones de la pseudo tomografía tridimensional.

Las representaciones tridimensionales de las Figuras 3.32-3.34, incluyen el conjunto de mapas de la distribución del *valor b* a profundidades de 1.04, 5.3 y 7.7 km (Figura 3.32) y los perfiles orientados NO-SE, paralelos a los sistemas de fallas La Virgen, La Reforma-El Azufre (Figura 3.33a) y SO-NE paralelo al Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (Figura 3.33b) y el perfil estratigráfico de Benton et al. (2011) (Figura 3.34). Así,

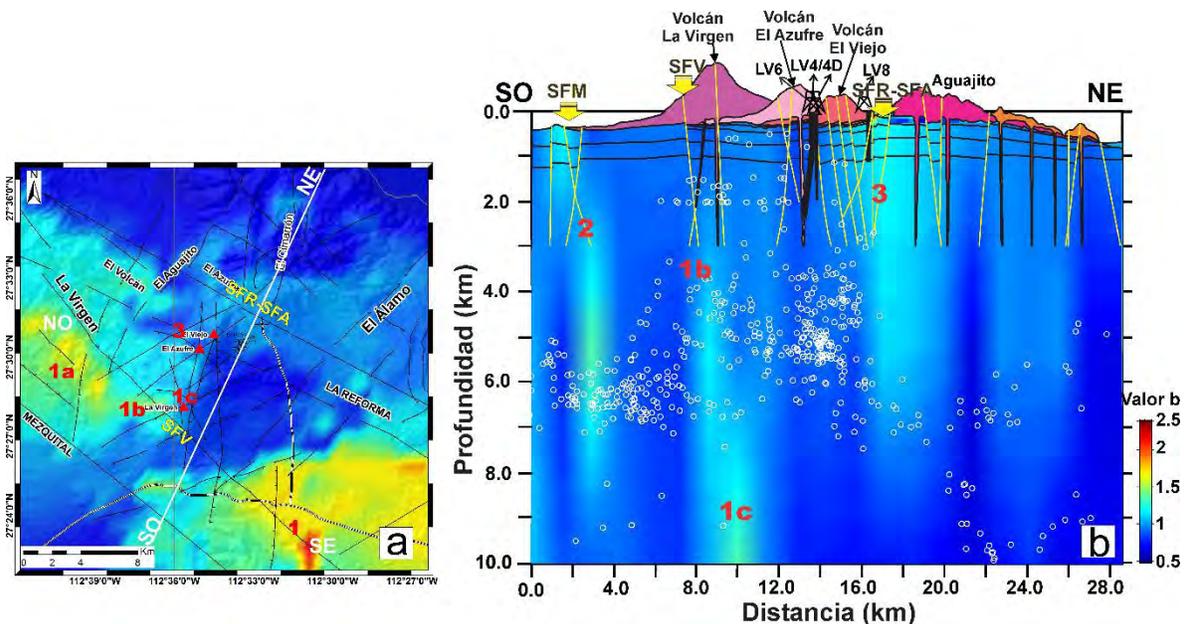
- 1) En la Figura 3.32a se presenta las distribuciones espaciales del *valor b* a las profundidades de 1.04, 5.3 y 7.7 km y en la Figura 3.32b el mapa del *valor b* a la profundidad de 5.3 km, sobrepuesto al mapa tectónico del CVGTV, así como la estimación del *valor b* a partir de las relaciones frecuencia-magnitud correspondientes a las zonas marcadas por los círculos blancos (Figura 3.32c). Los resultados muestran una significativa variación del *valor b* entre 0.5 y 2.5 ( $0.5 \leq b \leq 2.5$ ). Los *valores b* relativamente bajos ( $0.5 \leq b \leq 1.3$ ) se localizan en la zona central del CVGTV, a profundidades menores a 4 km, donde además, se ubican las fallas locales y se desarrollan las operaciones de inyección y producción del vapor geotérmico. Los *valores b* intermedios ( $1.3 \leq b \leq 1.7$ ) aparecen al oeste del cráter del volcán La Virgen donde se identificó la *anomalía 1b* y los *valores b* altos ( $1.4 \leq b \leq 2.5$ ) parecen seguir la tendencia de los principales sistemas de fallas locales y regionales, entre ellos: La Virgen (*anomalías 1, 1a*) y El Mezquital (*anomalía 2*). Óbserve que la *anomalía 1b* se muestra mejor definida a la profundidad de 5.3 km (Figura 3.32b) y por su ubicación y tendencia sugeriría la presencia de algún cuerpo anómalo.
- 2) En la Figura 3.33 se presenta los perfiles NE-SO y NO-SE (Figura 3.33a) elaborados con direcciones paralelas al CVTV (Figura 3.33b) y a los dos sistemas de fallas principales: La Virgen (SFV) y La Reforma-El Azufre (SFR-SFA) (Figura 3.33c) respectivamente. En estas figuras, además de las *anomalías 1, 1a, 1b* y *2*, se identificaron las *anomalías 1c* y *3*. La *anomalía 1c*, localizada por debajo del CVTV a profundidades mayores a 7 km, presenta *valores b* relativamente altos ( $b > 1.5$ ), que podría estar correlacionada a zonas de circulación de fluidos, flujos de calor, ¿intrusiones o diques?. Mientras tanto, la *anomalía 3*, ubicada a lo largo del sistema de fallas La Reforma-El Azufre presenta *valores b* intermedios ( $1.3 \leq b \leq 1.7$ ).



**Figura 3.32.** a) Tomografía pseudo 3D del *valor b* del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y mapas de distribución del *valor b* realizadas a profundidades de 1.04, 5.3 y 7.7 km. b) Mapa tectónico del CVGTV y distribución del *valor b* a la profundidad de 5.3 km. c) Relaciones frecuencia-magnitud obtenidas para los círculos con centros ubicados en el volcán La Virgen (azul) y zona sur del sistema de fallas La Virgen (rojo), con sus respectivos *valores b*, nivel de sismicidad (*a*) y magnitud de completitud (*Mco*).



3) En la **Figura 3.34** se presenta la distribución del *valor b*, sobrepuesta al perfil estratigráfico SO-NE de **Benton et al. (2011)**. Los resultados muestran anomalías con *altos valores de b* ( $1.4 \leq b \leq 2.5$ ) a lo largo de los sistemas de fallas La Virgen (SFV) (anomalía 1, 1a), El Mezquital (SFM) (anomalía 2) y La Reforma-El Azufre (SFR-SFA) (anomalía 3). Estos valores anómalos sugieren una combinación de procesos geológico-tectónicos y geotérmicos, tal como lo plantearon **McNutt (2005)**, **Farrel et al. (2009)**, **Legrand et al. (2011)**, **Viegas y Hutching (2011)**, **Kundu et al. (2012)** y **Legrand et al. (2014)**. Por un lado, los sistemas de fallas La Virgen, El Mezquital, La Reforma y El Azufre están caracterizadas por su alto grado de fracturamiento, en este último hasta con presencia de fumarolas, intensa alteración hidrotermal y altas temperaturas (90°C en superficie y 250°C a 2.5 km de profundidad) (**Hernández et al., 2010; Macías et al. 2011**). Mientras tanto, al oeste del cráter del volcán La Virgen y por debajo del CVTV, se identificaron las *anomalías 1b y 1c* (**Figuras 3.33b y 3.34b**), aunque presentan *valores b* entre 1.3 y 1.7, éstos no dejan de ser *altos* si se correlacionan con los obtenidos en otros campos geotérmicos (**Kaven et al., 2012; Dorbath et al., 2009; Bachmann et al., 2012**) y/o volcánicos (**Wiemer, 2001; Murru et al., 1999; Sánchez et al., 2005; Farrell et al., 2009; Garza, 2014**), donde estos *valores b anómalos* fueron asociados a la interacción roca-fluido, enjambres sísmicos y a cámaras magmáticas ubicadas a niveles superficiales y, en algunos casos, interconectados con otras más profundas. En este contexto, las *anomalías 1b y 1c*, estarían correlacionadas con posibles zonas de circulación de fluidos y/o flujos de calor, ¿intrusiones magmáticas o diques?



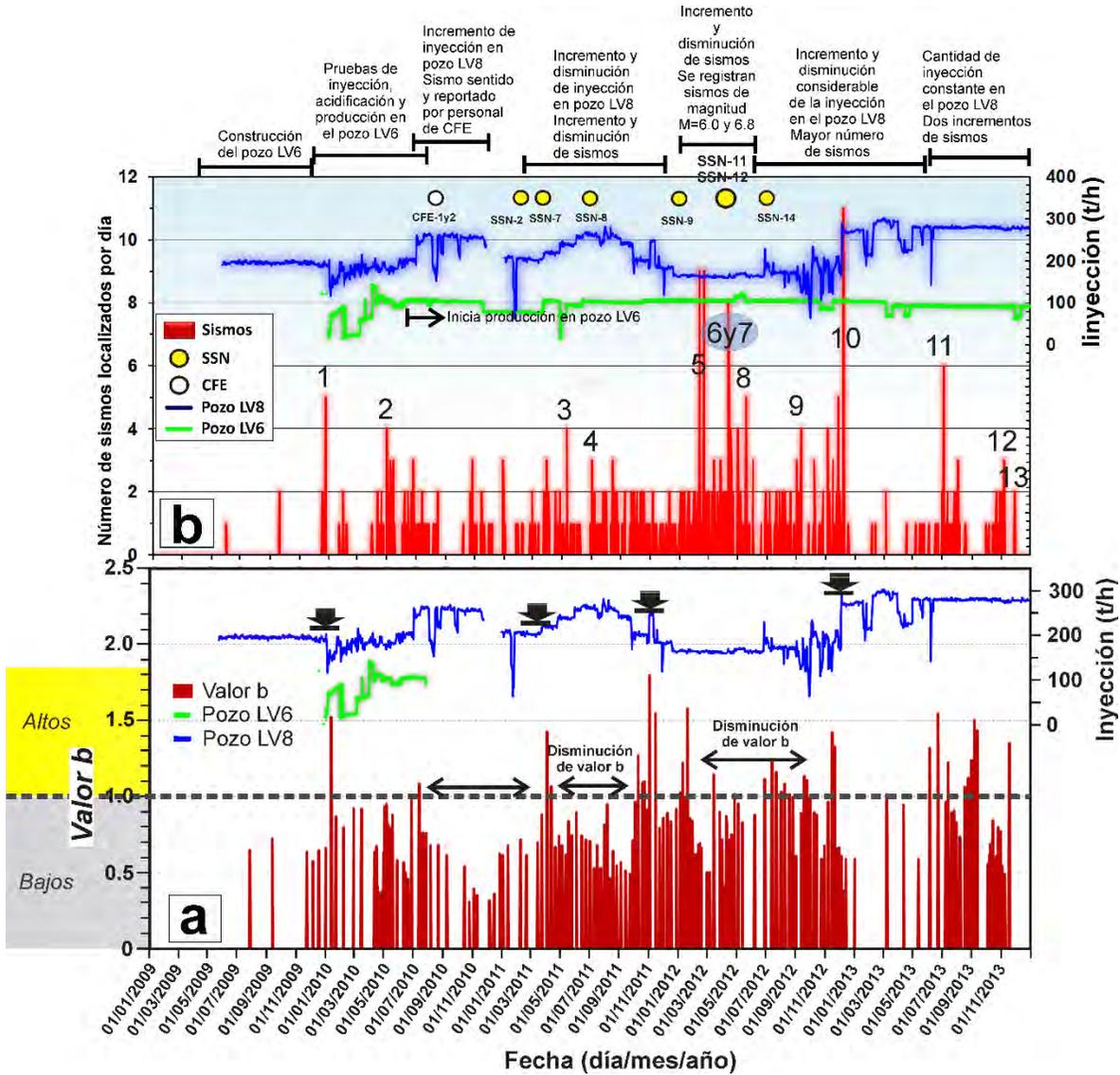
**Figura 3.34.** a) Mapa de la distribución del *valor b* a la profundidad de 5.3 km y localización del perfil estratigráfico en dirección SO-NE de **Benton et al. (2011)**. b) Distribución del *valor b*, obtenido de la tomografía pseudo 3D. Los números indican las anomalías de *valor b*. 1, 1b, 1c, 2 y 3 representan las anomalías del *valor b*. Las flechas en color amarillo muestran la ubicación de los sistemas de fallas mencionados.

### 3.7.5 Correlación temporal del *valor b* y la inyección

Para identificar la influencia de los periodos de incremento y disminución de la inyección de agua en el yacimiento geotérmico, se estimó la variación temporal del *valor b*, para ello se consideró una ventana de 50 eventos sísmicos como máximo y 25 como mínimo, que se desplaza a lo largo del tiempo. Asimismo, se estableció en el cálculo una desviación estándar menor a 0.3. Los resultados del *valor b* versus la cantidad de inyección son presentados en la [Figura 3.35a](#) y para efectos de comparación se incluye la [Figura 3.35b](#) donde se correlaciona el número de sismos por día con la cantidad de inyección en toneladas por hora (t/h). En esta misma figura se presenta los 13 enjambres sísmicos identificados durante el periodo 2003-2013.

Con relación a la [Figura 3.35a](#), se observa que los *valores b* predominantes ( $b > 1.4$ ) parecen estar correlacionados con incrementos bruscos en la inyección de agua (indicado por las flechas verticales), básicamente en su etapa inicial. Estos incrementos predominantes del *valor b* entre 1.49 y 1.79 y cantidades de inyección entre 152.5 y 278.5 t/h, fueron identificados entre diciembre 2009 y enero de 2010, marzo de 2011, enero de 2012, junio y septiembre de 2013.

Al comparar estos resultados con la ocurrencia de enjambres sísmicos ([Figura 3.35b](#)), se observan, claramente, *altos valores b* de 1.5 y 1.8, asociados a los enjambres 1 y 10, inducidos por las pruebas de inyección y estimulación del pozo LV6 e inyección en el pozo LV8; mientras tanto, los *valores b* “bajos” (0.8 a 1.2) o considerados como “normales” ( $b \sim 1$ ), están asociados a los enjambres 6 y 7, inducidos por el sismo regional de magnitud mayor ( $M=6.0$  y  $6.8$ ) del 12 de abril de 2012 y a la actividad sísmica netamente tectónica local y regional del CVGTV. Analizando un mayor periodo de tiempo, e indicado por las flechas horizontales en la [Figura 3.35a](#), se observa que los *valores b* disminuyen ante incrementos y disminuciones paulatinas de la inyección. Este mismo comportamiento fue observado por [Cuenot et al. \(2008\)](#) en el reservorio geotermal de Soultz-sous-Forêts (Alsacia, Francia).



**Figura 3.35.** Variación temporal del *valor b* y su correlación con la cantidad de inyección y pruebas de inyección de los pozos LV8 y LV6. Las flechas verticales indican periodos de incremento de inyección y las flechas horizontales la disminución del *valor b*. La línea discontinua de color plomo separa los valores  $b \leq 1$  asociados a procesos tectónicos y  $b > 1$  asociados a zonas volcánicas y geotérmicas.

### 3.8 RESUMEN GENERAL DEL ESTUDIO SISMOLÓGICO

Para una mejor comprensión, de los resultados obtenidos del análisis de la sismicidad del CVGTV, correspondiente al periodo 2003-2013, se elaboró la [Tabla 3.11](#). En esta tabla se resume lo siguiente:

- 1) Se localizaron 575 sismos, con magnitudes de coda ( $M_c$ ) menores a 3.2, profundidades menores a 6.5 km en la zona central del CVGTV (Zona A) y profundidades menores a 11 y 8 km en los alrededores de la Zona A (Zonas B, C y D). Estas profundidades máximas

a la que ocurren estos sismos, delinearían la zona de transición reológica frágil-dúctil (ZT) del CVGTV.

- 2) Se identificaron 13 enjambres sísmicos y se establecieron que cinco de ellos (1, 2, 3, 4 y 10) fueron inducidos por las pruebas de inyección y operación del pozo LV6 y la inyección del pozo LV8. Los 7 restantes (6, 7, 8, 9, 11, 12 y 13) estarían asociados a procesos tectónicos locales y regionales. De éstos, los enjambres 6 y 7, fueron inducidos por los sismos de magnitud mayor ( $M=6.0$  y  $6.8$ ) del 12 de abril de 2012, localizados a 111 y 109 km al NO de Gerrero Negro (B.C.S.) y  $\sim 170$  km al NO del CVGTV.
- 3) La inversión del tensor de esfuerzo fue realizada utilizando el programa Win-Tensor (Delvaux y Sperner, 2003; Delvaux, 2011) y la información de 51 mecanismos focales. Los resultados mostraron que el campo de esfuerzo preponderante del CVGTV, es de tipo extensivo.
- 4) Del análisis de la atenuación sísmica de ondas de coda ( $Q_c^{-1}$ ) o factor de calidad  $Q_c$ , elaborado para las frecuencias centradas en 2, 4, 8 y 16 Hz, permitió evidenciar, en general, una alta atenuación sísmica. Así, la ley de atenuación de  $Q_c$  promedio a la frecuencia de 1 Hz es de 29.57 ( $Q_c = 29.57 \pm 04f^{0.75 \pm 0.03}$ ); mientras que entre las Zonas, A, B, C y D fluctúan entre 29.57 y 21.14 respectivamente. Estos valores son comparables a los obtenidos en otros campos volcánicos y geotérmicos. Mientras tanto, la regionalización de isovalores de  $Q_c$  permitió identificar zonas de alta atenuación entre los volcanes el Azufre y El Viejo, donde además, se ubican los pozos de inyección y producción (procesos de explotación geotérmica), al NO del cráter del volcán La Virgen, a lo largo del lineamiento del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes (La Virgen, El Azufre, El Viejo) y los bordes de los sistemas de fallas regionales de tipo normal y strike-slip.
- 5) El análisis de los parámetros de fuente de 294 sismos registrados en el CVGTV, mostraron, en general, valores bajos. Así, por ejemplo, el momento sísmico ( $M_0$ ) varió entre  $2.4E+9$  y  $1.3E+13$  Nm, la caída de esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) entre 0.0015 y 3.26 MPa y la magnitud de momento ( $M_w$ ), entre 0.2 y 2.5. Los valores relativamente altos corresponden, principalmente, a los sismos registrados durante los días 12-18 de abril de 2012 (enjambre de sismos después de la ocurrencia de los sismos de magnitud mayor 6.0 y 6.8) y 17-23 de junio de 2013. El análisis del decaimiento del espectro sísmico evidencia que los sismos registrados en el CVGTV no siguen el patrón de caída de esfuerzo constante. Por lo tanto, contravienen a las hipótesis iniciales donde se establece que la caída de esfuerzo para los sismos tectónicos regionales y locales, incluido los inducidos por procesos de explotación geotérmica (Goertz-Allman et al., 2011), deberían exhibir un patrón de escalamiento constante. Estas diferencias podrían deberse a que en las zonas volcánicas y geotérmicas, los sismos son de menor magnitud,

además están presentes los efectos de circulación de fluidos, gases, altas temperaturas que pueden modificar, significativamente, el estado de esfuerzos de la zona; a éstos se suman, también, las dificultades propias del procesamiento para corregir los efectos de atenuación y/o efectos de sitio (Anderson, 1997; Abercrombie, 1995; Ide et al., 2003).

- 6) Para la evaluación del *valor b* del CVGTV, se utilizó un catálogo sísmico de 1275 sismos registrados entre 2009 y 2013, el programa ZMAP (Wyss et al., 2001) y la metodología de la distribución frecuencia-magnitud acumulada de Wiemer y McNutt (1998) y Zúñiga y Wyss (1995). Los resultados mostraron *valores b* altos o “anómalos” en las Zonas A ( $b=2.07\pm 0.2$ ), B ( $b=1.73\pm 0.04$ ) y C ( $b=2.05\pm 0.09$ ), asociados probablemente, a la alta heterogeneidad geológica y sismotectónica (especialmente por debajo del CVTV), a las operaciones propias de un campo geotérmico y la ocurrencia de enjambres (6 de ellos estrechamente correlacionados a la inyección de agua al yacimiento geotérmico); mientras que el *valor b* o “normal” a la zona D ( $b=1.036\pm 0.06$ ) asociada a la tectónica regional y local. Asimismo, el análisis de la tomografía pseudo 3D del *valor b*, ha permitido identificar 4 anomalías asociadas a los sistemas de fallas La Virgen (*anomalías 1 y 1a*), El Mezquital (*anomalía 2*), La Reforma-El Azufre (*anomalía 3*) y 2 anomalías ubicadas al oeste del volcán La Virgen (*anomalía 1b*), por debajo del CVTV (*anomalía 1c*) y a profundidades mayores a 4 y 7 km respectivamente. Por las características de su ubicación y profundidad, estas anomalías podrían estar asociadas a zonas de circulación de fluidos y/o flujos de calor, ¿intrusiones?

**Tabla 3.11.** Resumen de los resultados obtenidos del estudio sismológico del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), durante el periodo 2003-2013.  $\Delta\sigma$  es la caída de esfuerzo en MPa.

Explotación geotermal			Zonas sísmicas				Características
			Zona A	Zona B	Zona C	Zona D	
Sismicidad 2003-2013 (CVGTV)	Pozos de producción e inyección		X				Zona central del CVGTV
	Prof. (km)	Superficial (<6.5 km)	X				
		Profunda (>8.0 km)		X	X	X	Zonas periféricas: Bonfil-Mezquital, Aguajito
	Enjambres	N° de enjambres	8	1	1	3	Entre 2003 y 2013: 13 enjambres identificados.
		Inducido 1	5				Enjambres asociados a las pruebas de inyección y operación del pozo LV6 y la inyección del pozo LV8
		Inducido 2	1	1			Inducidos por los sismos de magnitud mayor (M=6.0 y 6.8) del 12 de abril de 2012
		Tectónica local y regional	3	1	1	3	8 enjambres
	Campo de esfuerzo	Extensivo	X	X	X	X	Campo de esfuerzo preponderante: extensivo
		Compresivo	X			X	
	Atenuación (Coda Q)	Alta	X	X	X	X	Entre los volcanes el Azufre y El Viejo, donde además, se ubican los pozos de inyección y producción (procesos de explotación geotérmica) Al NO del cráter del volcán La Virgen, a lo largo del lineamiento del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes (La Virgen, El Azufre, El Viejo) y los bordes de los sistemas de fallas regionales de tipo normal y strike-slip
		Baja					
	Parámetros de fuente	0.001 ≤ $\Delta\sigma$ ≤ 1 MPa	X				No cumple la ley de escalamiento de caída de esfuerzo constante.
		0.01 ≤ $\Delta\sigma$ ≤ 1 MPa		X	X	X	
	Valor b	Alto (1.5 < b < 2.0)	X	X	X		Asociados a: sistemas de fallas El Mezquital, La Virgen, La Reforma y El Azufre. Anomalía ubicada por debajo de los volcanes La Virgen y el Azufre, a profundidades mayores a 7 km: circulación de fluidos y/o flujos de calor, ¿intrusiones?.
		Normal (b ~ 1.0)				X	Asociados a: sistemas de fallas regionales y locales.

## CAPÍTULO 4

## ESTUDIO AEROMAGNÉTICO REGIONAL Y LOCAL

## 4.1 INTRODUCCIÓN

El método magnético, sustentado dentro de la teoría de los métodos potenciales (Blakely, 1996; Telford et al., 1990), permite acentuar, caracterizar y correlacionar las anomalías magnéticas con los elementos geológicos y estructurales, delinear sistemas hidrotermales y/o geotermales debido a que el proceso hidrotermal reduce, significativamente, la magnetización de las rocas ya sea por la demagnetización termal o por la alteración de los minerales magnéticos (Hochstein & Soengkono, 1997; Caratori-Tontini et al., 2012) y especialmente, estimar la profundidad a la temperatura de Curie (Blakely, 1988; Campos-Enríquez et al., 1989, 1990; Espinosa-Cardena & Campos-Enríquez, 2008). Según Carmichael (1982), en un campo geotérmico, la temperatura, no siempre excede la temperatura de Curie de la magnetita (580 °C); pero si podría alterar, disolver e incluso reemplazar los minerales magnéticos en otros menos magnéticos (Johnson et al., 1982; Auerbach & Bleil, 1987).

La temperatura de Curie, es la temperatura a la cual los minerales magnéticos pierden su carácter ferromagnético (~580 °C para la magnetita, a presión atmosférica; Ross et al., 2006) y pasan al estado paramagnético bajo el efecto térmico de la corteza y manto superior; en general, son considerados amagnéticos. Así, la isoterma de Curie corresponde a la profundidad a la base de los cuerpos magnéticos y su estimación es uno de los problemas más complicados en la inversión de campos potenciales de la cual forma parte la prospección magnética (Blakely, 1995).

En general, la profundidad a la cima y base de los cuerpos magnéticos pueden ser estimados a partir de los datos aeromagnéticos regionales con base a los métodos del análisis espectral y del centroide propuestos por Spector & Grant (1970) y Okubo et al. (1985, 1989) respectivamente. Spector & Grant (1970) establecieron la estimación de la cima de los cuerpos magnéticos, con base al decaimiento del logaritmo del espectro de potencia. Así, la profundidad a la cima de los cuerpos magnéticos ( $Z_c$ ) y la densidad espectral pueden simplificarse en:

$$\ln(P(k))^{\frac{1}{2}} = A_1 - k/Z_c \quad (4.1)$$

donde:  $A_1$  es una constante y  $k$  es el número de onda ( $2\pi/\text{km}$ ).  $Z_c$  es la profundidad a la cima de los cuerpos magnéticos y es obtenida como a la mitad del decaimiento del logaritmo del espectro de potencia versus el número de onda.

Mientras tanto, [Okubo et al. \(1985, 1989\)](#) sustentaron que la estimación de la profundidad a la base de los cuerpos magnéticos ( $Z_b$ ) pueden realizarse mediante la obtención del centroide ( $Z_0$ )

$$\ln(P(k)^{1/2}/k) = A_1 - k/Z_0 \quad (4.2)$$

donde  $(P(k)^{1/2}/k)$  es el espectro de potencia promedio y  $Z_0$  es la profundidad del centroide

Así, la profundidad promedio a la base de los cuerpos magnéticos ( $Z_b$ ) o la profundidad a la temperatura de Curie ( $Z_c$ ) pueden ser estimados de la siguiente relación:

$$Z_b = 2Z_0 - Z_c \quad (4.3)$$

En este estudio se analiza la información aeromagnética digital de campo total del estado de Baja California Sur, obtenidos por el Consejo de Recursos Minerales (CRM), ahora Servicio Geológico Mexicano ([SGM, 2008](#)) entre los años 2000 y 2008, para identificar las anomalías magnéticas correlacionadas a la geología y tectónica regional y local y estimar la profundidad a la temperatura de Curie.

Para el realce y caracterización de las anomalías magnéticas se aplicaron la primera y segunda derivada vertical (o de primer y segundo orden) ([Telford et al., 1990; Reynolds, 1977](#)). Estos resultados son cualitativos y permiten resaltar las anomalías de longitud de onda corta (altas frecuencias), asociadas a las características geológicas y tectónicas superficiales ([Reynolds, 1977](#)). Con respecto a los gradientes, éstos permiten resaltar las anomalías magnéticas de longitud de onda larga (bajas frecuencias) profundas o que pueden estar cubiertas por las anomalías de longitud de onda corta superficiales (altas frecuencias). Mientras tanto, para estimar la profundidad a la temperatura de Curie, se utilizaron las metodologías descritas por [Spector & Grant \(1970\)](#) y [Okubo et al. \(1985, 1989\)](#), ya utilizados por [Campos-Enríquez et al. \(1990\)](#) en el sector occidental del Cinturón Volcánico Mexicano, [Meridee \(1995\)](#) en la falla Meer, zona suroeste de Oklahoma, [Hochstein & Soengkono, \(1997\)](#) en la zona volcánica de Taupo en Nueva Zelanda, [Stampolidis et al. \(2005\)](#) en Albania, [Espinosa-Cardena & Campos-Enríquez \(2008\)](#) en el campo geotérmico de Cerro Prieto, [Tivey & Dymant \(2010\)](#) en sistemas hidrotermales, [Karastathis et al. \(2011\)](#) en el campo geotermal del Golfo Euboean en Grecia, [López-Loera et al. \(2011\)](#) en el complejo volcánico de Colima, [Caratori-Tontini et al. \(2012\)](#) en el lago Rotomahana (dentro de la zona volcánica de Taupo) en Nueva Zelanda, [Rosales-Rodríguez et al. \(2014\)](#) en el Golfo de México y [Noankwo & Shehu \(2015\)](#) en la cuenca Sotoko en Nigeria.

## 4.2 DATOS Y PROCESAMIENTO

Debido a que no se contó con datos magnéticos locales, se utilizaron los datos aeromagnéticos digitales obtenidos del Servicio Geológico Mexicano y corresponden a las Cartas Magnéticas de Campo Total Estatal Baja California Sur., Esc. 1:500,000 ([https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geofisica/california\\_sur.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geofisica/california_sur.pdf)) y la Carta Magnética de intensidad de Campo Total Santa Rosalía G12-1, B.C.S., Esc. 1:250,000 ([https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geofisica/14\\_G12-1\\_GF.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geofisica/14_G12-1_GF.pdf)). Estos datos fueron obtenidos entre los años 2000 y 2008 con varios vuelos aéreos, utilizando para ello, un magnetómetro Geometric G-822A, bombeo óptico de vapor de cesio, sensibilidad de 0.001 nanotesla (nT), sistema de adquisición Picodas P-101, con cámara de video Gem System GSM-19 Overhauser, un radar altímetro Sperry RT-220 y un sistema de navegación Ashtech GG24 GPS+GLONASS, 16 m. La altura de vuelo fue de 0.3 km, con líneas de exploración de rumbo N-S con espaciamientos de 1.0 km y distancia entre líneas de control de 10 km.

El procesamiento riguroso inicial de corrección e integración de datos, fue realizado por el Consejo de Recursos Minerales (CRM), ahora Servicio Geológico Mexicano (SGM). Los resultados del mismo, corresponde al mapa de isovalores de anomalías de intensidad de campo total (intervalos de 20 nT) mostrada en la [Figura 4.1](#) y publicada por el Servicio Geológico Mexicano ([https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geofisica/california\\_sur.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geofisica/california_sur.pdf)). Este mapa muestra variaciones de intensidad magnética entre -1199 y 4690 nanoteslas (nT), donde los altos y bajos magnéticos están representados por la gama de colores rojos y azules respectivamente.

Posteriormente, los datos aeromagnéticos digitales de la Península de Baja California y particularmente del estado de Baja California Sur, fueron procesados utilizando el programa GEOSOFT Oasis Montaj v. 7 y los algoritmos matemáticos propuestos por [Telford et al. \(1990\)](#) y [Reynolds \(1977\)](#) para la aplicación de la primera y segunda derivada vertical, gradientes con orientaciones de 10°, 20°, 50° y 70°, de [Spector & Grant \(1970\)](#) y [Okubo et al. \(1985\)](#) para estimar la profundidad a la temperatura de Curie.

## 4.3 MAPA AEROMAGNÉTICO DE ANOMALIAS DE CAMPO TOTAL

*A priori*, el mapa aeromagnético de anomalías de campo total, interpolado cada 20 nT ([Figura 4.1](#)), muestran claramente, 2 dominios magnéticos orientados en dirección noroeste (NO-SE) y oeste-este (O-E).

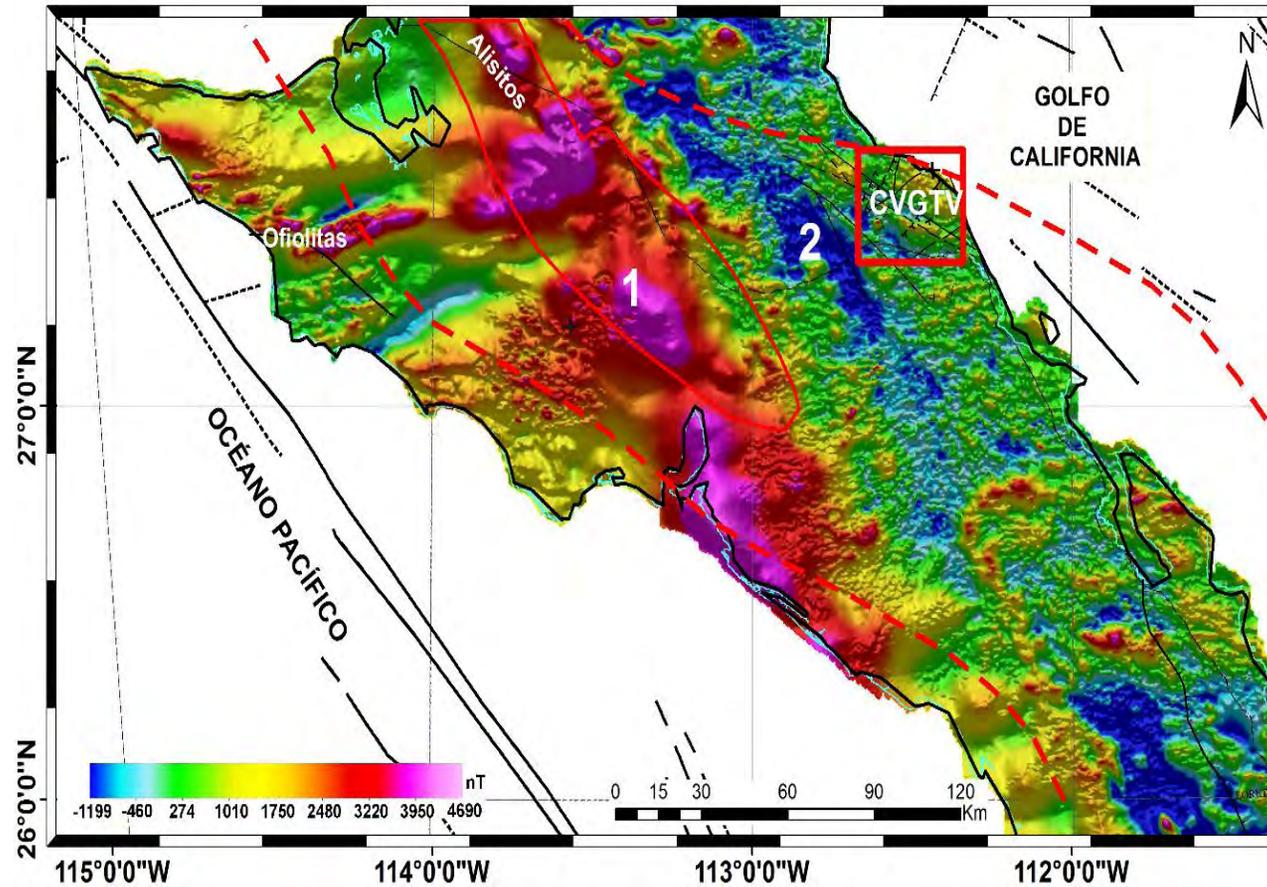
### 4.3.1 Dominios magnéticos regionales

El primer dominio (1), se caracteriza por presentar anomalías magnéticas de longitud de onda grande (altos magnéticos) entre 2500 y 3900 nT. Las anomalías más representativas se ubican en la zona central y oeste del mapa con áreas aproximadas de 6660 y 228 km<sup>2</sup>.

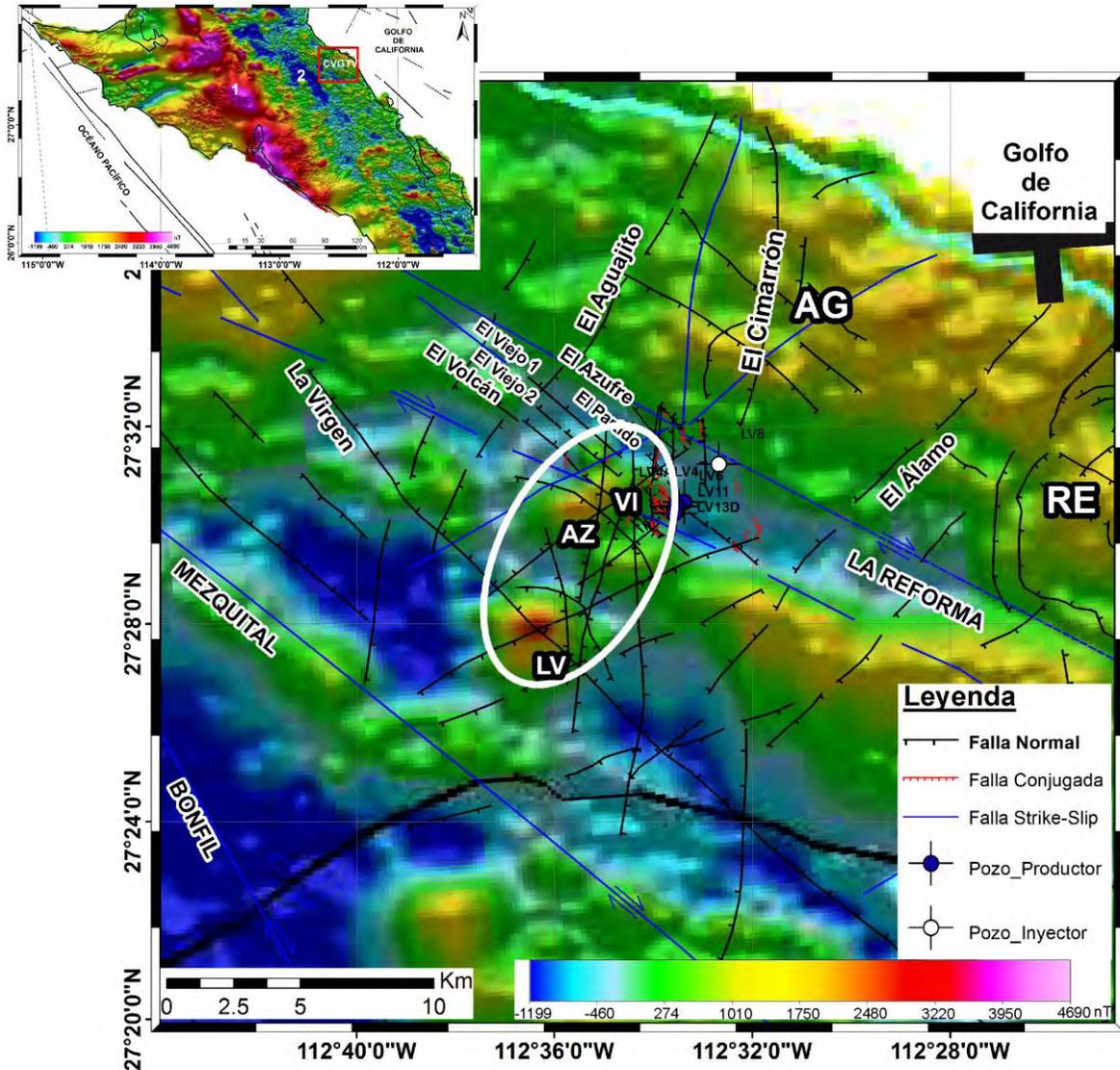
Presentan formas alargadas en dirección NO-SE, O-E y forman parte de los terrenos **Alisitos-Guerrero** y **Vizcaíno** respectivamente. Por su ubicación, longitud y dirección (NO-SE, O-E), los altos magnéticos de la zona central y oeste estarían asociados al arco y/o antearco Alisitos (Moore, 1983; Sedlock et al., 1993; Centeno-García et al., 2008, 2011) (figuras 2.3a, 4.1) y el complejo ofiolítico de Puerto Nuevo (Moore, 1983; Sedlock et al., 1993) (Figuras 2.3b, 4.1) que corresponden a remanentes de cortezas oceánicas antiguas, probablemente de la placa Farallón. Si bien la correlación de las anomalías magnéticas con el complejo ofiolítico está claramente establecida por su afloramiento en el mapa geológico regional (ver Figuras 2.3a, 2.3b), esto no sucede con el arco y/o antearco alisitos, puesto que el afloramiento que existe en esta zona corresponde a rocas volcano-sedimentarias del Cuaternario. Debido a que la aeromagnética refleja la existencia de importantes anomalías magnéticas (solamente correlacionables con rocas intrusivas o extrusivas, remanentes de corteza), permiten inferir, entonces, que el arco y/o antearco Alisitos está cubierta por estos afloramientos.

El segundo dominio (2), ubicado hacia el este (E), está compuesta por anomalías magnéticas de longitudes de onda variables, entre -1199 y 2400 nT, pero de dimensiones pequeñas comparadas con las anomalías del dominio magnético 1. Este dominio se extiende a lo largo del terreno Alisitos-Guerrero y del Arco Comondú, compuesto por rocas volcánicas del Cenozoico y rocas metamórficas que incluye, además, al CVGTV. La ampliación de las anomalías magnéticas (entre 2000 y 2400 nT) en la ubicación del Campo volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) mostrada en la Figura 4.2, estarían correlacionadas con intrusiones en las calderas volcánicas El Aguajito (AG), La Reforma (RE) y el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV), compuesta por los volcanes La Virgen (LV), El Azufre (AZ) y El Viejo (VI).

Obsérvese que en la zonas de manifestaciones geotermales (entre las fallas El Azufre y El Cimarrón) y donde se ubican los pozos de inyección y producción (zona de explotación del vapor geotérmico), coinciden con bajos magnéticos entre 100 y 200 nT. Estos resultados son similares a los observados por Björnsson et al. (1986) y Hersir et al. (1990) en el campo geotermal Hengill (Islandia), según estos autores, los bajos magnéticos coinciden con las manifestaciones geotermales, sugiriendo que la alteración hidrotermal debido a los fluidos geotermales influyen en la demagnetización de las rocas.



**Figura 4.1.** a) Mapa aeromagnético de anomalías de intensidad de campo total del estado de Baja California Sur. b) Mapa de terrenos tectonoestratigráficos y ubicación del arco y antearco Alisitos (Moore, 1983; Sedlock et al., 1993; Centeno-García et al., 2008, 2011). El cuadro en color rojo representa la ubicación del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGT); las líneas punteadas en color rojo separan los terrenos tectono-estratigráficos, el polígono en color rojo la ubicación del arco y/o antearco Alisitos; 1 y 2 son los dominios magnéticos altos y bajos respectivamente.



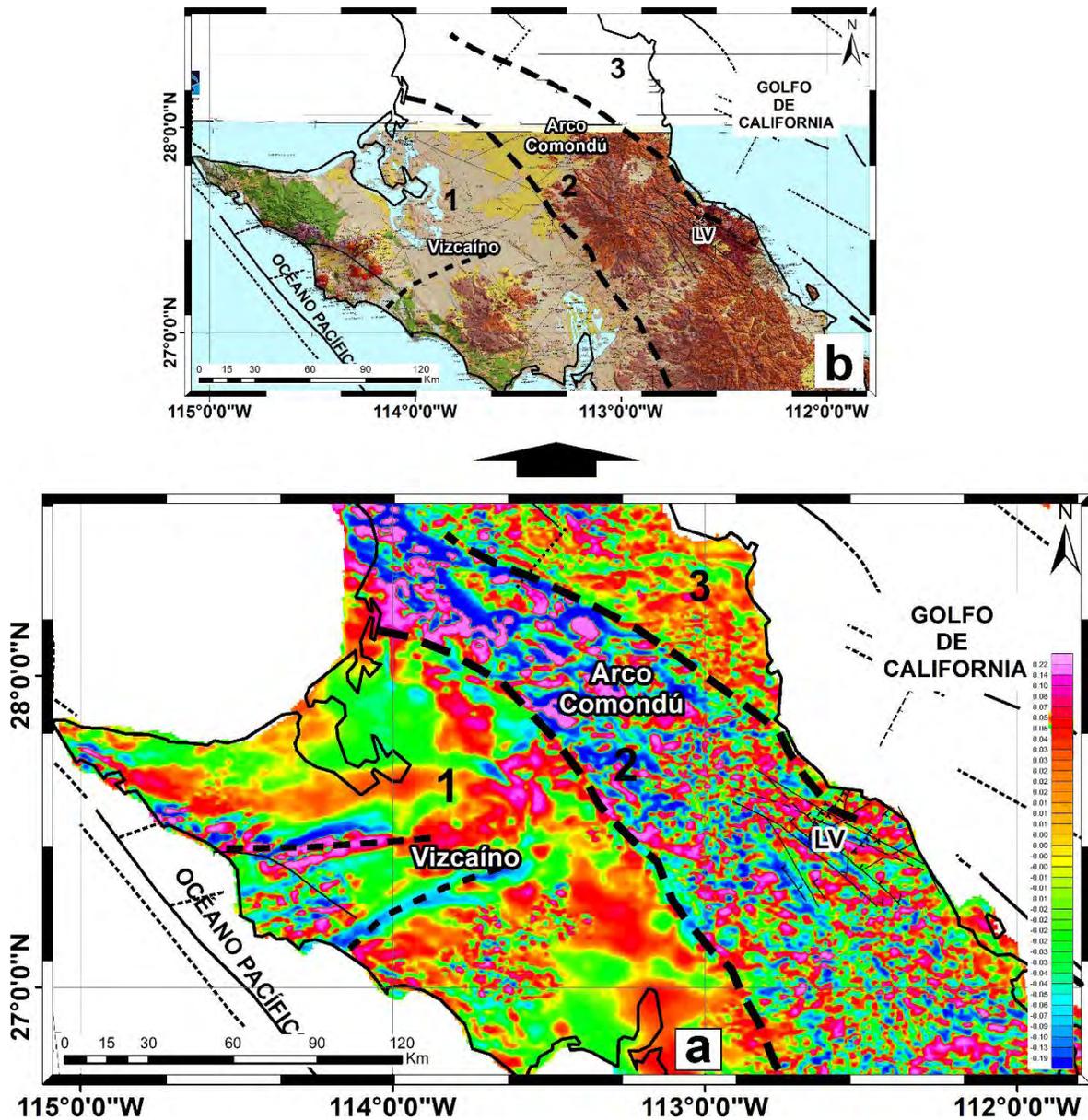
**Figura 4.2.** Mapa aeromagnético de anomalías de intensidad de campo total local sobrepuesta a las estructuras geológicas y tectónicas del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGT). La elipse muestra la ubicación del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV). LV= volcán La Virgen; AZ= volcán El Azufre; VI= volcán El Viejo.

#### 4.3.2 Mapas de derivadas

Si bien en las Figuras 4.1 y 4.2, fue posible identificar dos dominios magnéticos, éstos no son suficientes para identificar, con detalle, las anomalías magnéticas asociadas a rasgos geológicos y tectónicos a nivel regional y local; por ello, se procedió a la aplicación de la primera y segunda derivada vertical para realzar las anomalías magnéticas superficiales.

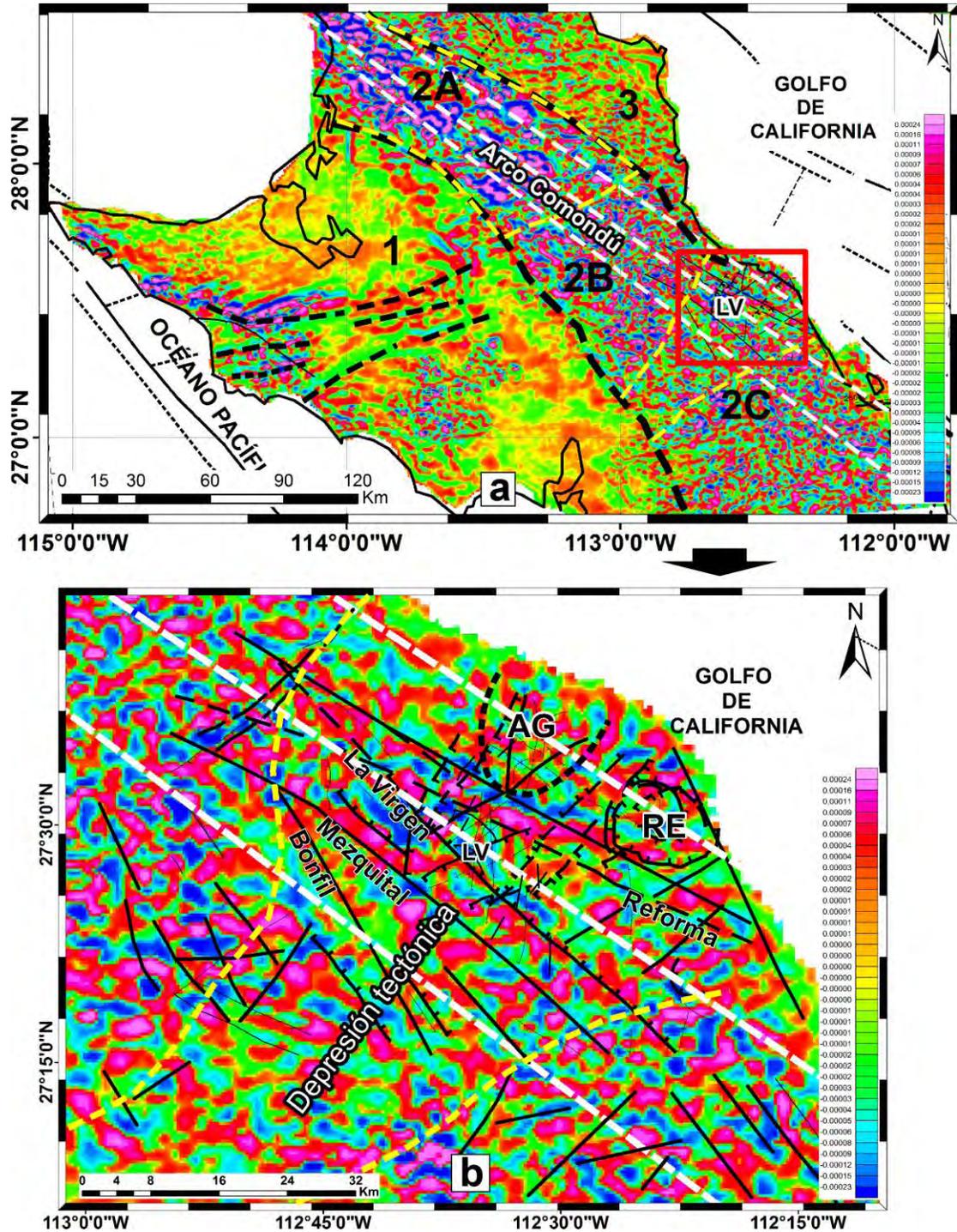
En la Figura 4.3a se presenta el mapa de la primera derivada regional donde se acentúan 3 dominios magnéticos de longitudes de onda variables; entre ellos, sobresale el dominio

magnético 2, que sobrepuesto al mapa geológico (Figura 4.3b), muestra la estrecha correlación de este dominio con el arco continental Comondú orientado en dirección NO-SE.



**Figura 4.3.** a) Mapa de la primera derivada donde se resalta los dominios magnéticos 1, 2 y 3. b) Mapa geológico y tectónico del Estado de baja California Sur. Las líneas discontinuas en color negro resaltan el dominio magnético 2 que corresponde al cinturón continental que se extiende en dirección NO-SE. LV= volcán La Virgen.

La segunda derivada (Figura 4.4a), permitió realzar, con mayor detalle, los 3 dominios identificados previamente (Figura 4.3a). En el dominio 1, se identificaron lineamientos con dirección O-E; mientras tanto, en el dominio 2, dentro del Arco Comondú, las anomalías magnéticas muestran una dirección preferencial NO-SE.



**Figura 4.4.** a) Mapa regional de la segunda derivada donde se muestra, con mayor detalle, los 3 dominios magnéticos y los subdominios 2A, 2B y 2C. Las anomalías magnéticas muestran la probable continuidad de las fallas transformantes provenientes del Golfo de California (líneas discontinuas en color blanco). b) Ampliación de las anomalías magnéticas y la tectónica local (líneas en color negro) en la ubicación del CVGTV. Las líneas discontinuas en color negro y amarillo representan los lineamientos inferidos y la delimitación de la depresión SO-NE respectivamente. AG = Caldera El Aguajito; RE = Caldera La Reforma.

Debido a su gran longitud y orientación, sobre estas anomalías se sobrepusieron la extensión de las fallas transformantes regionales provenientes del Golfo de California (Sumy et al., 2013). Los resultados son más que evidentes, pues muestran la correlación de la distribución de las anomalías magnéticas con estas fallas regionales, sugiriendo así, su continuidad a lo largo del Arco Comondú (dominio 2). En este mismo dominio, se puede identificar que las anomalías magnéticas, aunque siguen la orientación NO-SE, presentan longitudes variables que fueron subdivididos en 3 dominios; el primero con longitudes relativamente grandes (2A), intermedios (2B) y pequeños (2C); en éste último, se ubica el CVGTV (Figura 4.4b).

El análisis de las anomalías magnéticas, dentro del dominio 2C, permite inferir que la continuidad de las fallas transformantes provenientes del Golfo de California (NO-SE) estaría asociada a los sistemas de fallas El Mezquital-Bonfil, La Virgen y La Reforma. Asimismo, la variación de las longitudes de onda en dirección O-E, parece delimitar un graben con dirección SO-NE, dentro del cual se desarrolla el campo volcánico y geotérmico de Las Tres Vírgenes. Dentro de este graben, la distribución de las anomalías magnéticas al norte y sur del CVTV y la caldera El Aguajito (AG) se correlacionan con las fallas Aguajito (Benton et al., 2011) y El Álamo (López et al., 1995).

### 4.3.3 Mapas de gradientes

Como se mencionó previamente, este proceso se realizó para orientaciones de 10°, 20°, 50° y 70°, las dos primeras para resaltar anomalías magnéticas con dirección N-S y NO-SE y las dos últimas para resaltar las anomalías magnéticas con dirección O-E.

A nivel regional, el mapa de las gradientes de 10° (Figura 4.5a) y 20° (Figura 4.5b) muestran la estrecha correlación de las anomalías magnéticas con la probable continuidad de los sistemas de fallas transformantes procedentes del Golfo de California, que se extienden a lo largo del Arco Comondú. Asimismo, se logra identificar algunos lineamientos en dirección O-E, básicamente en la zona noroccidental de Baja California Sur, donde se ubica el complejo ofiolítico Puerto Nuevo.

Con respecto a los mapas de gradientes con orientaciones de 50° (Figura 4.6a) y 70° (Figura 4.6b), el realce de las anomalías magnéticas, además de la posible continuidad de las fallas transformantes, sugieren lineamientos con dirección O-E, los cuales se localizan, principalmente, en el cinturón continental y en la zona noroccidental de Baja California donde se muestra el afloramiento del complejo ofiolítico de Puerto Nuevo (Figura 4.6c). En efecto, al sobreponer en el mapa de anomalías magnéticas obtenidas aplicando la gradiente de 70° (Figura 4.6b) sobre el afloramiento de ofiolitas (remanentes de corteza oceánica de la placa Farallón), es evidente la correlación entre ellas, considerando su alineación y espesor, además de las largas amplitudes de las anomalías magnéticas observadas en los diferentes mapas de anomalías de intensidad de campo total, derivadas (1 y 2) y gradientes (10°, 20° y 50°) (ver

Figuras 4.1-4.6). Similares características fueron reportados por Fujiwara et al. (1999) en el cinturón ofiolítico de Mineoka en Japón, Savvaidis et al. (2000) en el complejo ofiolítico de la Península de Chalkidiki en Grecia, Eccles et al. (2005) en el cinturón ofiolítico de la Montaña Dun en Nueva Zelanda, Michels et al. (2014) en el complejo ofiolítico Leka en Noruega y Subba et al. (2016) en las ofiolitas de las islas Andaman en Sumatra.

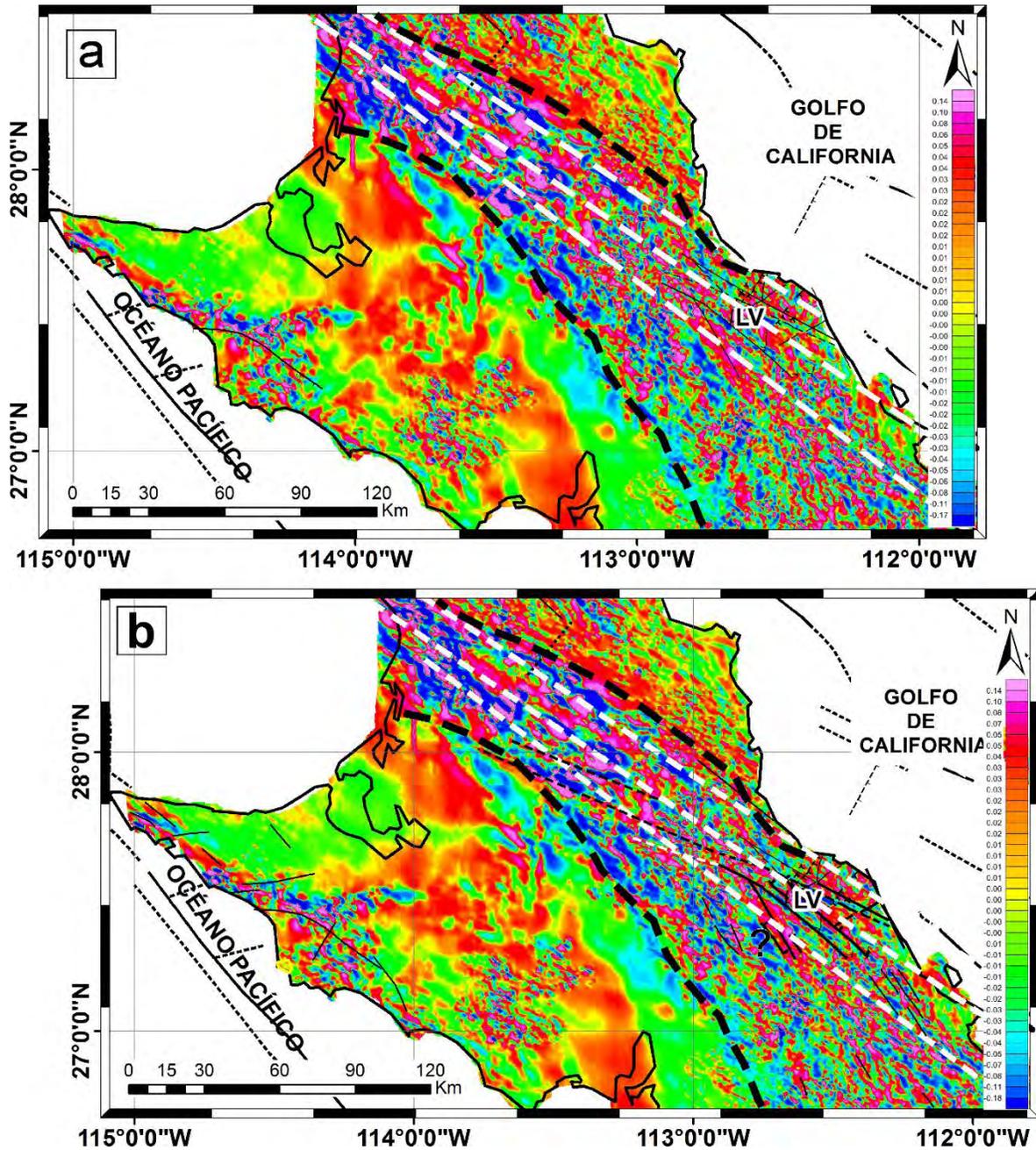


Figura 4.5. Mapas regionales de gradientes de 10° (a) y 20° (b). En ambas figuras, las anomalías magnéticas muestran la posible continuidad de las fallas transformantes del Golfo de California.



A nivel local, el análisis los mapas de gradientes con orientaciones de 20° (Figura 4.7a) y 70° (Figura 4.7b) muestran una buena correlación con la disposición de las anomalías magnéticas y la prolongación de los sistemas de fallas transformantes regionales y fallas locales con dirección NO-SE, entre ellos destacan los sistemas de fallas El Mezquital-Bonfil, La Virgen y La Reforma. Mientras tanto, en la Figura 4.7b (gradiente de 70°), resalta las anomalías magnéticas asociadas a las fallas con dirección NE-SO, entre ellos destacan El Aguajito y El Álamo. Esta correlación también se presenta con fallas orientadas en dirección O-E y ubicadas al norte y sur del volcán La Virgen.

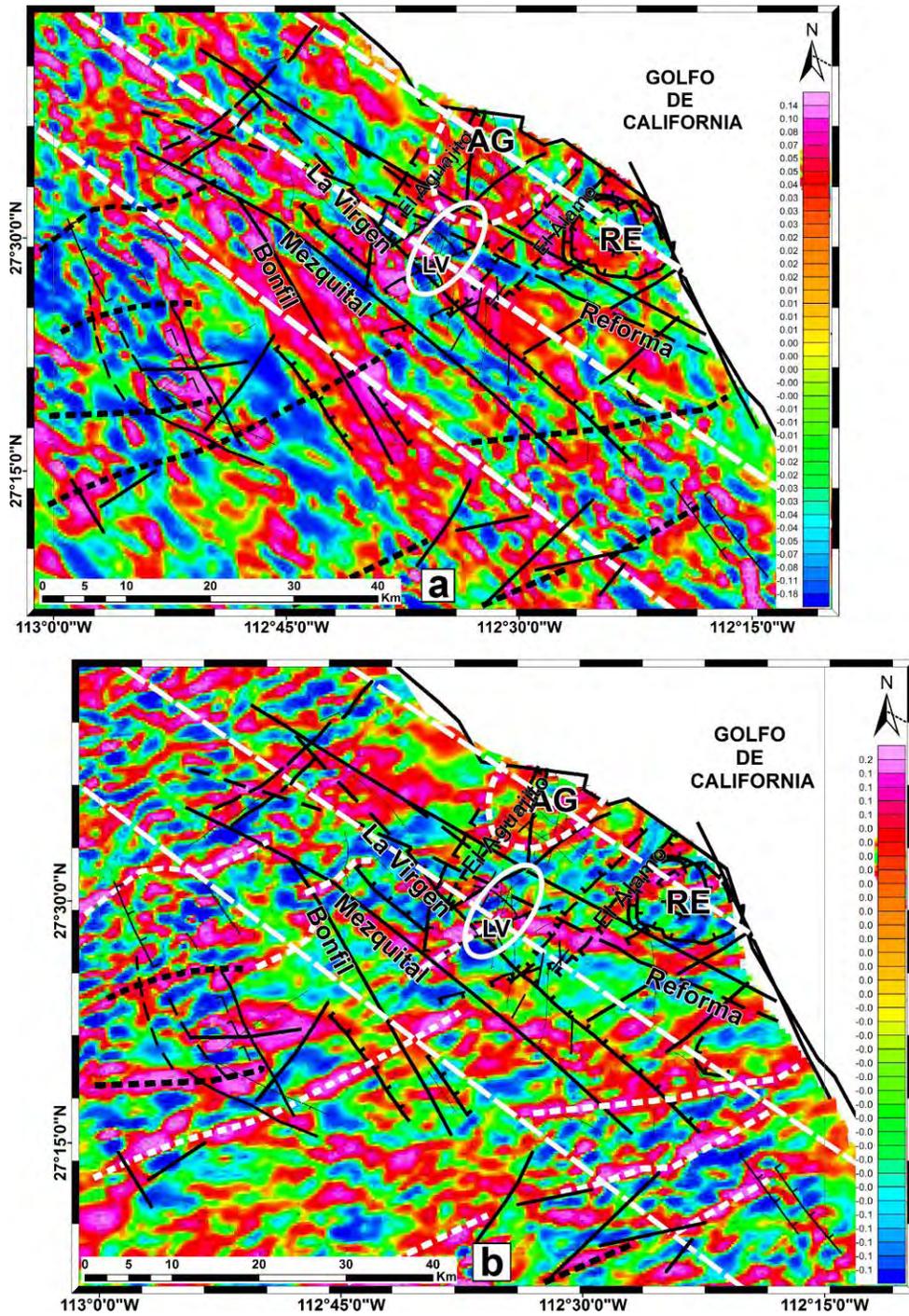
Si bien muchas de estas anomalías coinciden con las fallas mapeadas, otras por el contrario, fueron inferidas a partir de estos mapas de gradientes y están representadas con líneas discontinuas. Debido a la buena distribución de estas anomalías, es posible inferir que las posibles fallas o lineamientos no estarían expuestas en superficie o podrían estar cubiertas.

### 4.4 PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO MAGNÉTICO Y A LA TEMPERATURA DE CURIE

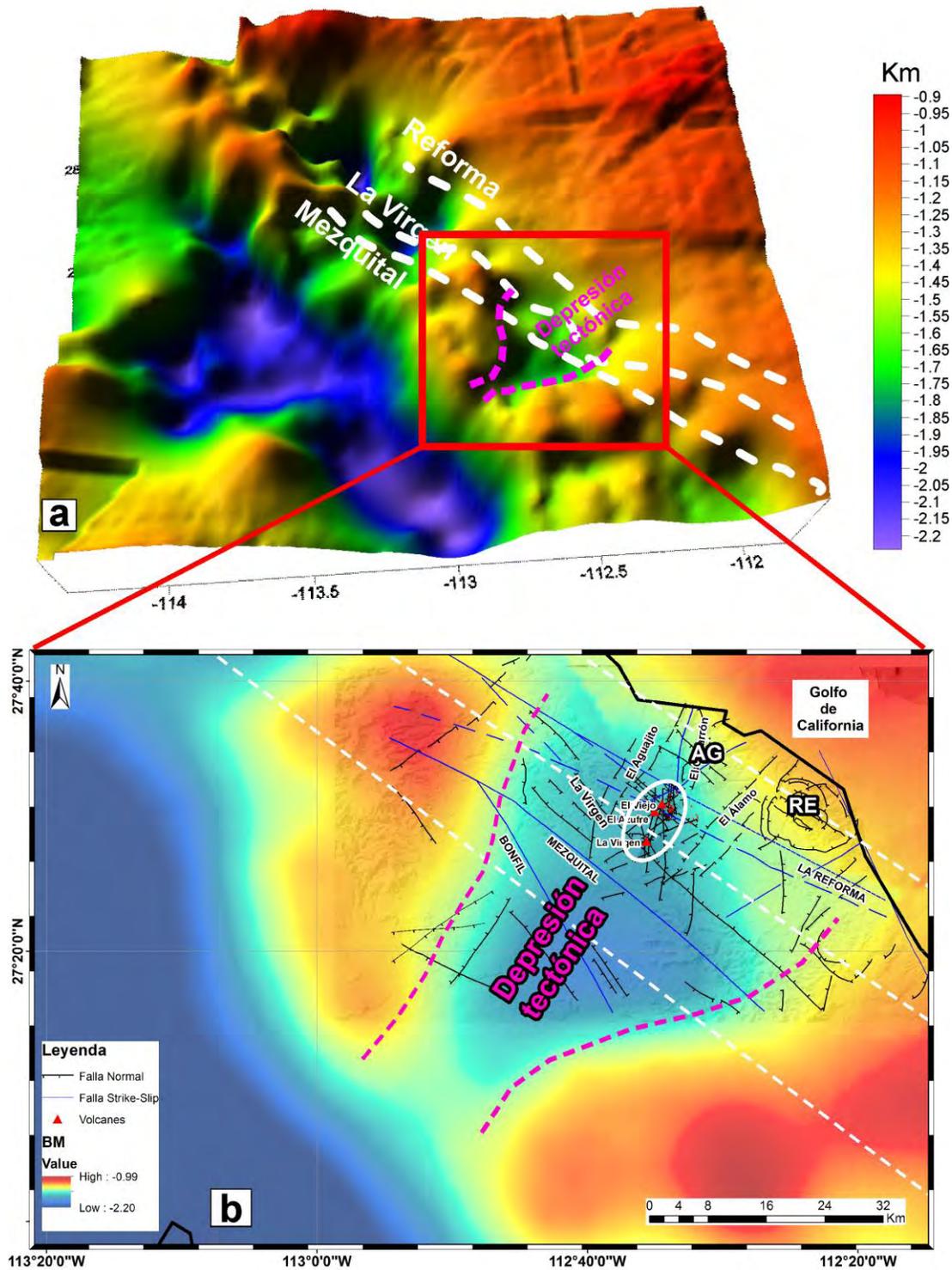
A partir de las metodologías descritas por Spector & Grant (1990) y Okubo et al. (1985, 1989), se estimaron la profundidad al basamento magnético y la profundidad a la temperatura de Curie.

Los resultados numéricos mostraron que el basamento magnético presenta profundidades superficiales entre 0.9 y 2.2 km. La representación tridimensional del basamento magnético presentada en Figura 4.8a, delinea la continuación de los sistemas de fallas transformantes del Golfo de California, que en el CVGTV pasan a lo largo de los sistemas de fallas El Mezquital, La Virgen y La Reforma. En esta Figura 4.8a, así como en la ampliación de la zona del CVGTV (Figura 4.8b), se evidencia una importante depresión tectónica. Similar a lo observado en las Figuras 4.4a y 4.4b, en esta depresión en dirección SO-NE se desarrollan una intensa actividad tectónica regional y local, el vulcanismo (anterior y reciente) representados por las calderas Aguajito, Reforma, el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) y la geotermia con la explotación del vapor geotérmico. Por lo tanto, esta configuración general sugiere que la tectónica controlaría todos estos procesos.

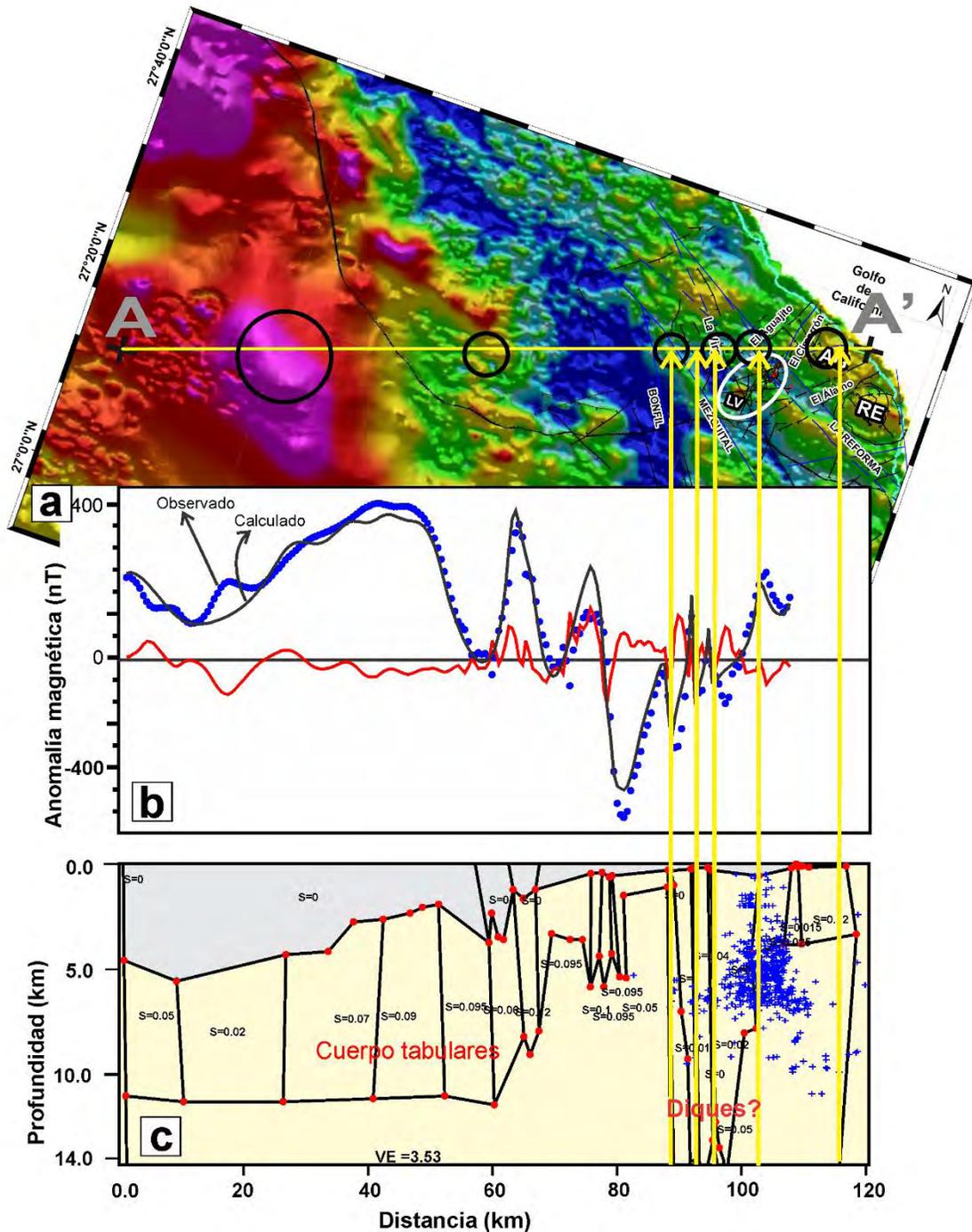
Para realizar el modelado aeromagnético y de este modo definir, con mayor detalle, la geometría y profundidad de los cuerpos magnéticos, se seleccionó el perfil A-A' orientado en dirección oeste suroeste-este noreste (OSO-ENE) y cruza la zona donde se ubica el CVGTV (Figura 4.9a). El ajuste del modelado bidimensional mostrado en la Figura 4.9b, fue realizado considerando cuerpos poligonales bidimensionales y debido a la falta de estudios propios de la zona sobre la susceptibilidad de las rocas, se asumió, preliminarmente, susceptibilidades magnéticas entre 0.002 y 0.1 SI, que guardan relación con las rocas que afloran en esta zona. También se consideró la sismicidad registrada en el CVGTV, los cuales presentan hipocentros entre 0.5 y 10 km de profundidad. Con toda esta información, en la Figura 4.9c, se presenta la interpretación del modelado aeromagnético.



**Figura 4.7.** Ampliación de los mapas de gradientes con orientaciones de 20° (a) y 70° (b) correspondientes al CVGTV. Las anomalías magnéticas de campo total se correlacionan con los sistemas de fallas regionales NO-SE y locales NE-SO (a) y O-E (b). La elipse en color blanco muestra la ubicación del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes. LV= volcán La Virgen.



**Figura 4.8.** a) Representación tridimensional regional de la profundidad al basamento magnético. b) Ampliación del CVGTV, con la distribución del basamento magnético a nivel local. Las líneas discontinuas en color blanco y magenta representan la prolongación de las fallas provenientes del Golfo de California y la delimitación de la depresión tectónica en dirección SO-NE.



**Figura 4.9.** a) Mapa aeromagnético de campo total y trazo del perfil aeromagnético (A-A') para el modelado bidimensional de los cuerpos magnéticos. b) Ajuste del perfil aeromagnético. c) Interpretación del modelado y representación de los cuerpos magnéticos en profundidad. Las flechas amarillas muestran la correlación de los cuerpos tabulares (¿diques?) identificados en el CVGTV y su representación en superficie (círculos en color negro, Figura 4.9a); las cruces en color azul representan a la sismicidad registrada entre el 2003 y 2013.

Los resultados muestran una capa superior, posiblemente volcano-sedimentaria, con profundidades variables desde 4.8 km en el extremo oeste suroeste (OSO) hasta 0.5 km hacia el ENE donde se desarrolla el CVGTV. A mayor profundidad, el modelado se correlaciona con posibles cuerpos tabulares de espesores y susceptibilidades variables entre 2-15 km y 0.02-0.095 SI; así por ejemplo, hacia el OSO las profundidades varían entre 5 y 12 km y en la parte central entre 1 y 6 km. Mientras tanto, por debajo del CVGTV (Figura 4.9c), estos cuerpos tabulares se extienden desde la superficie hasta profundidades mayores a los 14 km y corresponderían a posibles diques por donde ascenderían los fluidos que alimentan al campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.

Una vez obtenida la profundidad al basamento magnético y la obtención del centroide, se procedió a estimar la profundidad a la temperatura de Curie y/o isoterma de Curie. Esta estimación, básicamente regional, fue realizada considerando ventanas de 200 x 200 km y 150 x 150 km. Los resultados de la estimación de la temperatura de Curie varían entre 18.92 y 23.32 km, los cuales coinciden con profundidad de la corteza en Baja California Sur, obtenidas por Persaud et al. (2007) (20.9-23.7 km) y Fernández (2014) (~25 km), mediante el método sísmico de funciones receptoras. Estos resultados sugerirían que a estos niveles de profundidad (~8 y 25 km) la base de la corteza se encontraría a temperaturas relativamente elevadas.

### 4.5 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO AEROMAGNÉTICO

- 1) El análisis del mapa aeromagnético de anomalías de campo total regional, muestra que los altos magnéticos están correlacionados con el subterreno Alisitos y las ofiolitas de Puerto Nuevo (Terreno Vizcaíno); mientras que los las anomalías magnéticas de longitud de onda corta con el Arco Comondú.
- 2) A nivel local: los altos magnéticos están asociados a diques o intrusiones en las calderas volcánicas El Aguajito (AG), La Reforma (RE) y el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV).
- 3) Los mapas de derivadas y gradientes con orientaciones 10°, 20°, 50° y 70° muestran la posible continuación de los sistemas de fallas transformantes con dirección NO-SE provenientes del Golfo de California. Además permiten inferir la existencia de una depresión tectónica con dirección SO-NE.
- 4) El modelado, evidencia cuerpos tabulares, probablemente asociados a diques por donde circularían los fluidos que alimentan el CVGTV.
- 5) Regionalmente, la profundidad a la T° de Curie fue estimada entre 18.92 y 23.32 km, coincidiendo con profundidad de la corteza en Baja California Sur, obtenidas por Persaud et al. (2007) (20.9-23.7 km) y Fernández (2014) (~25 km), mediante el método sísmico de funciones receptoras (~25 km) mediante estudios sismológicos de funciones

receptoras. Estos resultados sugerirían que a estos niveles de profundidad (~ 8 y 25 km) la base de la corteza se encontraría a temperaturas relativamente elevadas.

- 6) Finalmente, estos resultados del estudio aeromagnético muestran que la tectónica controlaría el vulcanismo, la geotermia y actividad sísmica en la zona de Las Tres Vírgenes y de las calderas de La Reforma y El Aguajito.

## CAPÍTULO 5

### ESTUDIO MAGNETOTELÚRICO

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

La magnetotelúrica (MT) fue introducida por [Tikhonov \(1950\)](#) y [Cagniard \(1953\)](#), para estudiar cuencas sedimentarias. Posteriormente, con el desarrollo de nuevos algoritmos de procesamiento y equipos sofisticados, este método geofísico de exploración profunda, se extendió a la investigación volcánica, tectónica, exploración petrolera, minera y geotérmica.

En los últimos años, diversos estudios han sido llevados a cabo en diferentes partes del mundo para detectar zonas promisorias para el desarrollo geotérmico ([Heise et al., 2007](#)), identificar capas de resistividad del subsuelo que estén asociados a los sistemas de fallas en profundidad, capas de arcilla ([Nurhasan et al., 2006](#)), zonas de circulación de fluidos hidrotermales ([Ingham et al., 2009](#)), zonas de alta temperatura ([Harinarayana et al., 2006](#); [Spichak et al., 2007](#)), zonas de alteración de los minerales y fusión parcial ([Volpi et al., 2003](#); [Árnason et al., 2000](#)), conductos y cámaras magmáticas ([Hill et al., 2009](#)).

Sin embargo, debido a la complejidad geológica y tectónica donde se desarrollan estos campos geotérmicos y volcánicos, las capas de resistividad podrían no ser fácilmente correlacionados con uno u otro proceso; por ello, [Berkold \(1983\)](#), [Oskooi et al. \(2005\)](#) entre otros, propusieron algunos modelos conceptuales representativos para caracterizar la distribución de la resistividad en profundidad en un campo geotérmico. Así, los sistemas geotermiales de alta temperatura, ampliamente explorados para la producción de energía eléctrica, estarían asociados a la intrusión de magma a niveles superficiales (<10 km) y la convección hidrotermal ocurriría sobre este cuerpo intrusivo ([Berkold, 1983](#)).

En zonas geotérmicas donde la permeabilidad y la alteración es alta, la capa de baja resistividad que sobreyace al reservorio geotérmico de alta resistividad, correspondería a la capa de arcilla ([Oskooi et al., 2005](#)). Mientras tanto, los reservorios geotermiales que se desarrollan dentro de complejos volcánicos, usualmente, están controlados por sistemas de fallas y presentan 3 principales capas de resistividad; la primera, corresponde a la capa superficial compuesta por aluviales, ceniza y rocas volcánicas recientes, con resistividades que varían de decenas a centenas de ohm-metro ( $\Omega\text{m}$ ); la segunda capa de baja resistividad (<10  $\Omega\text{m}$ ) está compuesta por minerales de esmectita y zeolita, cuya temperatura de formación varía entre 70 °C y 220 °C ([Árnason et al., 2010](#); [Cumming y Mackie, 2010](#)) y estaría correlacionada

a la cima del yacimiento; la tercera capa de resistividad intermedia a alta (decenas a centenas), son detectados por debajo de la zona de baja resistividad. En esta capa, las condiciones de alta temperatura (200 y 250°C) favorecen la formación de minerales secundarios de alta resistividad tales como la illita y la clorita (~ 240 °C) (Newman et al., 2008; Árnason et al., 2010; Cumming y Mackie, 2010).

Con base en estos modelos y con el propósito de representar la distribución de resistividad en el subsuelo, se han elaborado diversos algoritmos de inversión en 1 dimensión (1D), 2 dimensiones (2D) y 3 dimensiones (3D). Los dos primeros son los algoritmos, comúnmente utilizados y relativamente de fácil acceso, disponibilidad y requerimientos mínimos de cómputo. Sin embargo, es preciso señalar que la Tierra, presenta una complejidad geológica y tectónica importante, especialmente en zonas de actividad volcánica y geotérmica; por lo tanto, la representación 1D y 2D limita el conocimiento real del subsuelo. Sin embargo, para optar la aplicación de un determinado algoritmo de inversión en 1D, 2D o 3D, se analizan la dimensionalidad de la estructura y el *strike* regional.

Para la representación tridimensional (3D) de las resistividades del subsuelo, Mackie et al. (1994), Siripunvaraporn et al. (2005), Siripunvaraporn y Egbert (2009) y Kelbert et al. (2013), desarrollaron modelos de inversión 3D robustos y de menor tiempo de cómputo, los cuales son utilizados con éxito en la exploración de campos geotérmicos y estudios de investigación tectónica y volcánica. Algunos ejemplos de ellos comprenden los campos geotermales de Hengill y Krafla (Islandia) (Árnason et al., 2010; Gasperikova et al., 2011), Sabalan en Irán (Ghaedrahmati et al., 2013), Tendaho en Islandia (Didana y Heinson, 2015), los volcanes Monte Ruapehu en Nueva Zelanda (Ingham et al., 2009), Uturuncu en Bolivia (Comeau et al., 2014) y Lascar en Chile (Díaz et al., 2012), tectónica del sur de Alberta en Canadá (Nieuwenhuis et al., 2014) y el sistema acuífero de Lluçmajor en España (Arango et al., 2009).

En el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), los estudios magnetotelúricos fueron realizados por Vázquez et al. (1992), Romo et al. (1994), Romo-Jones y Wong-Ortega (2000) y Romo et al. (2005) y patrocinados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como parte de los estudios geofísicos de exploración geotérmica. Los resultados de estos estudios, particularmente de Romo et al. (2005), sugieren la presencia de dos zonas anómalas de baja resistividad; la primera, entre 5 y 12 km aproximadamente que podría estar asociada a la fuente de calor y/o fluidos salinos y la segunda, más superficial que estaría correlacionada con las rocas volcánicas de la formación Santa Lucía.

En este estudio, se analizan estos datos magnetotelúricos obtenidos entre los años 1992 y 1994; para ello se hizo uso de las metodologías de procesamiento e inversión 3D, los cuales fueron realizados con la estrecha colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de Alberta (Canadá), este último representado por el Dr. Martyn Unsworth y su grupo de trabajo.

### 5.1.1 El Método Magnetotelúrico (MT)

El método MT utiliza la interacción natural de las ondas electromagnéticas (EM) con la Tierra, para medir la resistividad y/o conductividad eléctrica en profundidad (Chave y Jones, 2012). Las fuentes naturales que generan estos campos en el subsuelo, abarcan un rango entre  $10^{-4}$  y 10 Hz y están asociadas a la interacción de la actividad solar con la magnetósfera (<1 Hz) y las tormentas tropicales cuya perturbación se propaga en la atmósfera de la Tierra (>1 Hz) (Kaufman y Keller, 1981). La bondad de este método es la profundidad de investigación y comprende desde cientos de metros hasta kilómetros, la cual depende de la frecuencia de registro; es decir, a frecuencias más bajas o periodos más largos, la profundidad de investigación será mayor y viceversa.

El aspecto teórico del método está basado en las ecuaciones de Maxwell (1861), quien unificó las leyes de Faraday, Gauss y Ampere para describir los fenómenos electromagnéticos de la naturaleza. A partir de estas ecuaciones y complementando con otras expresiones adicionales, establecieron la dependencia del comportamiento de los campos con las propiedades eléctricas y magnéticas del medio donde se propagan. Las componentes de ambos campos, el eléctrico y el magnético son medidos, simultáneamente, en una investigación magnetotelúrica. Las componentes del campo magnético son 2 horizontales ( $H_x$ ,  $H_y$ ) y una vertical ( $H_z$ ); mientras que las componentes del campo eléctrico son dos horizontales ( $E_x$ ,  $E_y$ ).

Así, el tensor de impedancia  $Z(f)$  describe la relación entre los campos eléctricos  $E(f)$  y magnéticos  $H(f)$  a una frecuencia  $f$ , mediante la relación:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

La impedancia  $Z(f)$  es un tensor complejo que correlaciona las mediciones del campo electromagnético y la resistividad del subsuelo.

La resistividad aparente ( $\rho_a$ ) y la fase ( $\varphi_{xy}$ ) pueden ser estimadas mediante las relaciones:

$$\rho_{a_{xy}} = \frac{1}{2\pi f \mu_0} |Z_{xy}|^2 \quad (5.2)$$

$$\varphi_{xy} = \tan^{-1}[Z_{xy}] = \tan^{-1} \left[ \frac{E_x}{E_y} \right] \quad (5.3)$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética.

Según [Chave y Jones \(2012\)](#) la forma del tensor de impedancia  $Z$  dependerá de si la resistividad del subsuelo es representado en 1D, 2D o 3D; por ello, es necesario analizar la dimensionalidad de la estructura geoelectrica y la dirección del strike regional.

Las metodologías, comúnmente utilizadas son: el análisis de los vectores de inducción ([Parkinson, 1959](#); [Wiese, 1962](#)); el análisis del *skew* ([Swift, 1967](#); [Bahr, 1991](#)), descomposición del tensor ([Jones y Groom, 1993](#); [McNeice y Jones, 2001](#)), y el tensor de fase ([Caldwell et al., 2004](#)). Obviamente, la aplicación de cada una de estas metodologías asume ciertas condiciones que, en algunos casos, facilitan la buena interpretación de la dimensionalidad y por lo tanto, la selección del modelo de inversión apropiado.

Así por ejemplo, el método de [McNeice y Jones \(2001\)](#), corresponde a un problema inverso de tipo estadístico donde se asume que la estructura resistiva regional es 2D y que los datos están afectados por la distorsión galvánica que provienen de los ángulos de giro (*twist*) y cizalla (*shear*), la anisotropía y la ganancia. Con este método es posible estimar estas distorsiones, particularmente, los ángulos de giro y de cizalla. Sin embargo, el *strike* regional estimado con esta técnica, conlleva una ambigüedad inherente de  $90^\circ$ . Para corregir esta ambigüedad es necesario correlacionar con la tectónica de la zona y otros estudios geofísicos.

Por otro lado, [Caldwell et al. \(2004\)](#) asumen que el tensor de fase es independiente de las distorsiones galvánicas y representa la dimensionalidad a través de elipses. Estas elipses están caracterizadas por una dirección del *strike* ( $\alpha$ ) y 3 invariantes representados por el eje mayor, eje menor y el *skew* ( $\beta$ ). En una estructura 1D los ejes mayor y menor tienen igual magnitud (círculo) y  $\beta=0$ . En una estructura 2D,  $\beta=0$  y los ejes mayor o menor de las elipses mostrarán una alineación paralela al strike regional  $\alpha$  ó  $\alpha+90^\circ$ . En una estructura 3D,  $\beta$  mide las desviaciones de la estructura 2D ( $\beta \neq 0$ ) y el eje principal de la elipse se alineará a la dirección del flujo de corriente inductiva representado por  $\alpha-\beta$ , que es equivalente o cercano al *strike* regional de una estructura geoelectrica 2D.

En cuanto a los vectores de inducción ([Parkinson, 1959](#); [Wiese, 1962](#)), estos pueden ser calculados de las componentes vertical y horizontal de los campos magnéticos causados por los contrastes laterales de la resistividad. Para su representación en un mapa se utilizan 2 convenciones; en la primera, la parte real de los vectores apuntan fuera del conductor ([Wiese, 1962](#)) y en la segunda apuntan hacia el conductor ([Parkinson, 1959](#)). Sin embargo, la primera convención es la más utilizada en los estudios MT (por ejemplo, [Díaz et al., 2012](#); [Ghaedrahmati et al., 2013](#); [Nieuwenhuis et al., 2014](#); [Comeau, 2015](#)). En un caso 2D, la parte real de los vectores de inducción son perpendiculares a la dirección del *strike* regional, pero en un caso 3D, no se observa una dirección consistente pues los vectores señalan a todos lados. Cabe mencionar que el tamaño de los vectores de inducción aporta información adicional de la cercanía a dicho conductor y/o a los contrastes de resistividad de los mismos.

## 5.2 LOS DATOS MAGNETOTELÚRICOS DEL CVGTV

Los datos magnetotelúricos (MT) utilizados en este estudio fueron recopilados de la base de datos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE); estos a su vez, fueron obtenidos por [Vázquez et al. \(1992\)](#) y [Romo et al. \(1994\)](#) entre los años 1992 y 1994. Ambos grupos de autores registraron 90 sondeos MT y para ello, utilizaron el equipo EMI, Inc., propiedad del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE). Según [Palma-Guzmán, 1998](#), cada sondeo MT registró 3 componentes del campo magnético ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) y 2 componentes del campo eléctrico ( $E_x$ ,  $E_y$ ), en un intervalo de frecuencias entre 0.005 y 100 Hz (200 y 0.01s) y para asegurar la calidad de los registros, se empleó la técnica de referencia remota ([Gamble et al., 1979](#)). De esta base de datos proporcionada por CFE, fue posible recuperar 70 de ellos. A éstos se sumaron 9 datos proporcionados por el Dr. José Romo de CICESE (comunicación personal), esta información formó parte de su estudio publicado en el año 2005 ([Romo et al., 2005](#)). Así, se elaboró una base de datos preliminar compuesta por 79 sondeos.

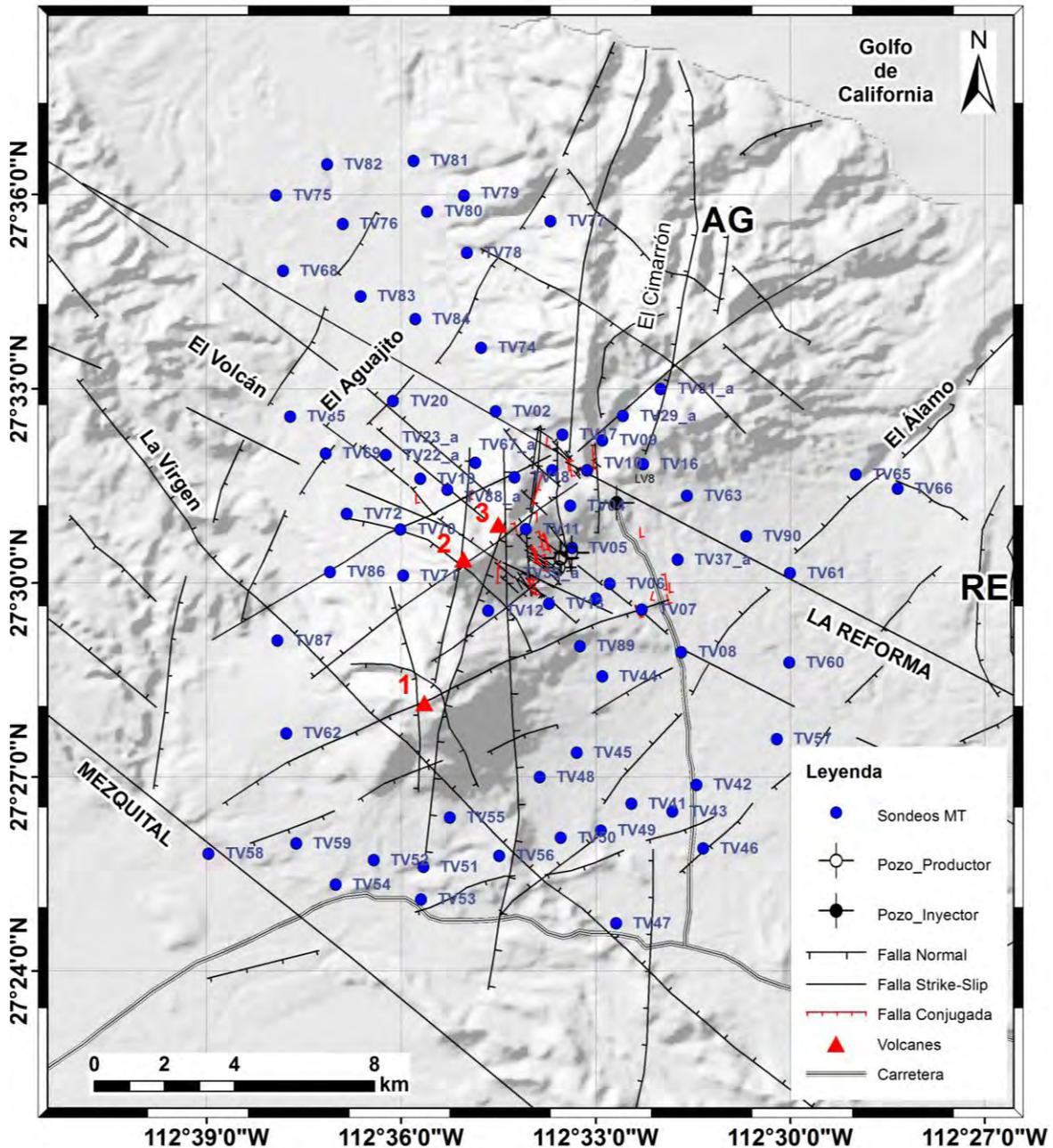
En la [Figura 5.1](#), se muestra la ubicación geográfica de los sondeos MT renombrados como TV01, TV02..., TV90, TV90\_a. Los datos con la terminación “\_a” corresponden a los recopilados de [Romo et al. \(2005\)](#). Tal como se observa en la figura, la distancia entre sondeos es variable y fueron condicionados a la topografía; sin embargo, se puede observar una buena cobertura dentro del CVGTV y específicamente, en la zona de explotación geotérmica.

## 5.3 PROCESAMIENTO DE DATOS MT

Para el procesamiento inicial de los 79 sondeos MT, que involucra el despliegue individual de las curvas de resistividad aparente y fases para eliminar datos anómalos, se hizo uso del programa [WinGLink v.1.6 y 2.2](#) y el conjunto de programas de procesamiento desarrollados en la Universidad de Alberta. Este proceso permitió seleccionar 70 sondeos MT ([Anexo 3](#)) y descartar 9 de ellos debido a la baja calidad de los datos ([Figura 5.1](#)). Estos datos seleccionados, a su vez, fueron clasificados en 4 tipos: A, B, C y D ([Figuras 5.2](#)), considerando similares características en la forma de las curvas de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) y fase ( $\Phi$ ).

### 5.3.1 Tipos de curvas de resistividad aparente

El **Tipo A**, agrupa el mayor número de curvas de resistividad aparente y fase (43) ([Figura 5.2](#)) y se registraron en todo el CVGTV. Se caracterizan por presentar resistividades aparentes  $\rho_a$  que varían entre 2 y 80  $\Omega\text{m}$  para periodos cortos (<0.1 s), seguido de  $\rho_a$  que varían entre 1 y 10  $\Omega\text{m}$  para periodos entre 1 y 10 s, y  $\rho_a$  entre 10 y 100  $\Omega\text{m}$  para periodos mayores a 10 s. Según [Ingham et al. \(2009\)](#) este tipo de curvas que presentan altos valores en la fase y valores bajos de resistividad ( $\rho_a \leq 10 \Omega\text{m}$ ), indicarían la presencia de un conductor (anomalías de resistividad) a profundidades superficiales.



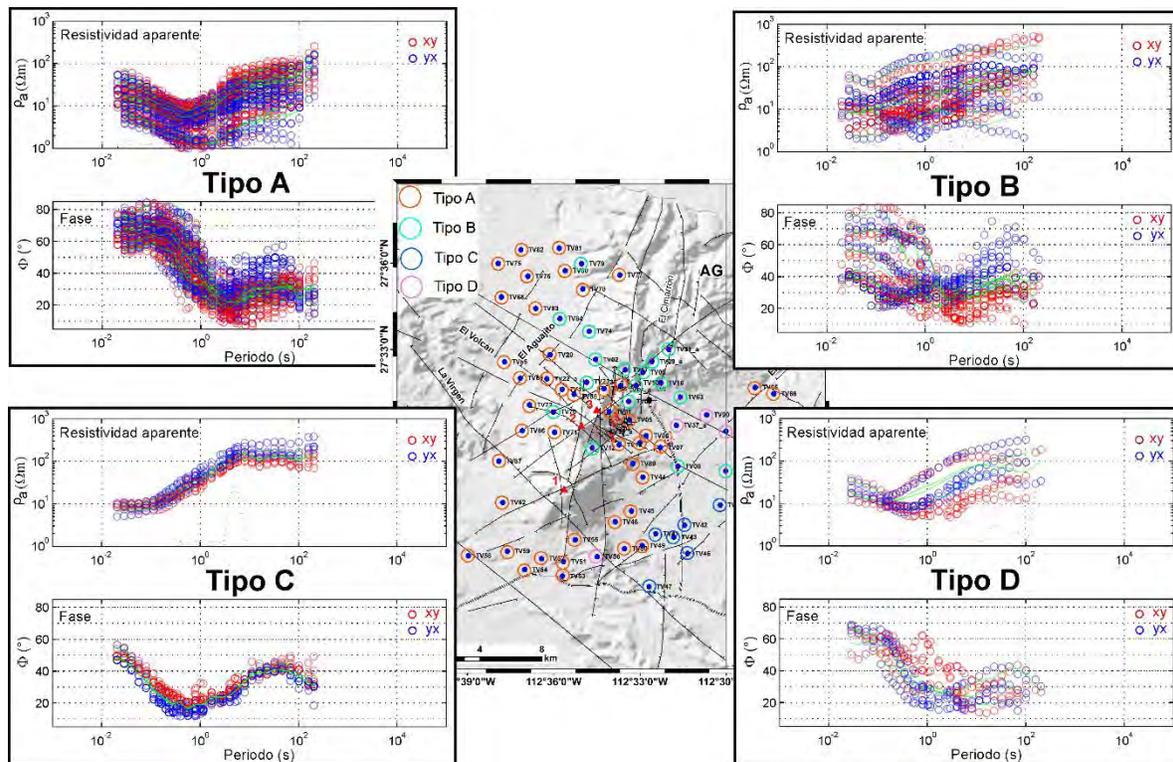
**Figura 5.1.** Ubicación de los sondeos magnetotelúricos alrededor del CVGTV. AG= caldera El Aguajito, RE= caldera La Reforma, 1= La Virgen, 2= El Azufre, 3= El Viejo.

El de **Tipo B**, agrupa 17 curvas de  $\rho_a$  y fase (Figura 5.2). Este tipo a diferencia del Tipo A, no presenta una forma definida, pero presentan curvas de  $\rho_a$  consistentes con sus respectivas curvas de fase. Como se puede ver en la figura, las curvas de  $\rho_a$  incrementan desde  $3 \Omega m$  hasta  $300 \Omega m$  para los periodos entre 0.2 y 100 s. Por su ubicación en el CVGTV, es posible inferir que esta variedad de curvas registradas se deben a la complejidad geológica y tectónica que existe bajo la ubicación de dichos sondeos; así por ejemplo, en la intersección de las fallas El Azufre-

La Reforma, El Cimarrón y la Caldera El Aguajito. Según [Hernández et al. \(2010\)](#) y [Macías et al. \(2011\)](#) en esta zona se evidenciaron un intenso fracturamiento superficial, alteración hidrotermal y presencia de fuentes termales y fumarolas. Similares características se presentan en la intersección de los volcanes La Virgen y El Azufre, donde se ubica el sondeo LV12.

El **Tipo C** ([Figura 5.2](#)), agrupa 6 curvas de  $\rho_a$  y fase. Aunque son mínimos en número, estos presentan incrementos de la resistividad desde  $10 \Omega\text{m}$  hasta  $400 \Omega\text{m}$  para periodos entre 0.1 y 80 s. Para periodos mayores a 80 s, sugiere la presencia de una capa resistista entre 100 y  $200 \Omega\text{m}$ , los cuales podrían estar ubicados al SE y SO de los sistemas de fallas La Virgen y El Álamo.

El **Tipo D**, agrupa 4 curvas de  $\rho_a$  y fase ([Figura 5.2](#)) que fueron registrados entre los sistemas de fallas El Azufre y/o su continuación hacia el sur como La Reforma y El Álamo. En estas curvas se observa una zona de baja resistividad ( $1\text{-}5 \Omega\text{m}$ ) para periodos 0.8 y 6 s. Para periodos mayores a 10 s, la resistividad incrementa hasta alcanzar valores de  $100 \Omega\text{m}$ .



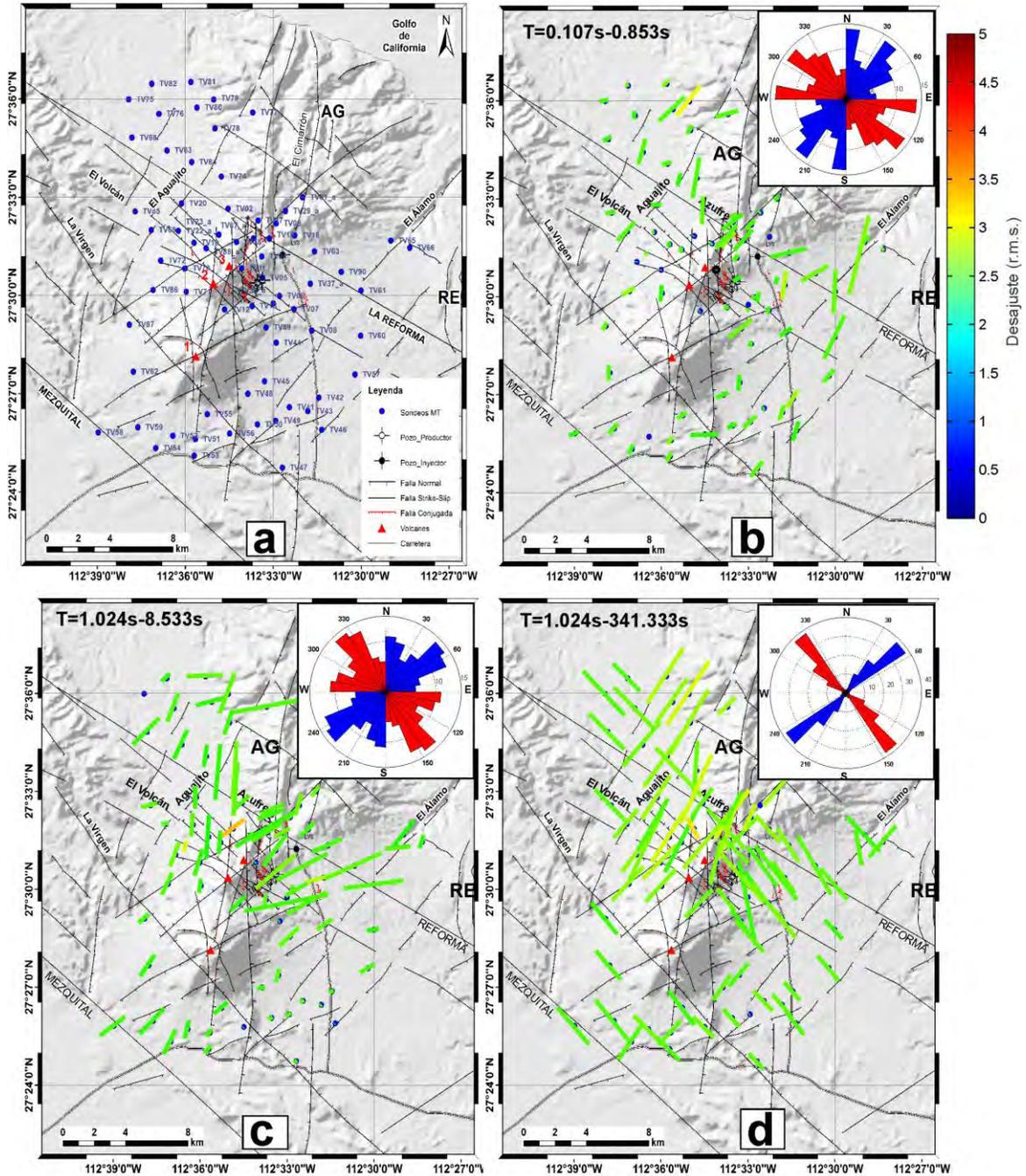
**Figura 5.2.** Ubicación de los sondeos MT y tipos de curvas de resistividad y fase identificadas en el CVGTV ([Figura 5.1](#)); yx y xy son las curvas de resistividad aparentes que corresponden al campo eléctrico en la dirección magnética NS y EW respectivamente.

### 5.3.2 Análisis de la dimensionalidad y direccionalidad

Una vez identificado los tipos de curvas de  $\rho_a$ , se analizó la dimensionalidad de la estructura geoelectrica predominante en el CVGTV y la dirección del *strike* regional. Para este fin, se utilizaron los métodos de descomposición del tensor de impedancias de [McNeice y Jones \(2001\)](#), el tensor de fase de [Caldwell et al. \(2004\)](#) y los vectores de inducción magnética utilizando la convención de [Wiese \(1962\)](#). Todos estos métodos fueron aplicados utilizando los algoritmos respectivos, los cuales fueron desarrollados y/o cuya licencia fueron obtenidos por el Dr. Martyn Unsworth y su grupo de trabajo, en la Universidad de Alberta (Canadá). Los resultados obtenidos son presentados en las [Figuras 5.3, 5.4 y 5.5](#).

La evaluación de la descomposición del tensor de impedancias ([McNeice y Jones, 2001](#)) fue realizada para 3 rangos de periodos: la primera, entre 0.107 y 0.853 s ([Figura 5.3b](#)), la segunda, entre 0.24 y 8.533 s ([Figura 5.3c](#)), y la tercera, entre 1.024 y 341.333 s ([Figura 5.3d](#)). En estas figuras, el color de la línea representa el desajuste (raíz cuadrático medio, RMS.) entre los datos medidos y los calculados con el método; así, el color verde (RMS ~2.5) representa la mejor solución del método. Asimismo, la longitud de la línea representa la máxima diferencia entre las fases de los modos TE y TM. En una estructura geoelectrica 1D, no hay variación de la impedancia con el azimut, entonces la longitud de la línea será cero. En los diagramas de rosas, el color azul representa las direcciones preferenciales obtenidas con el método, y el color rojo representa la dirección alterna posible.

En general, los resultados obtenidos para periodos cortos ([Figuras 5.3b y 5.3c](#)), muestran una variación en la longitud y color de las líneas, sugiriendo que las estructuras geoelectricas del CVGTV, en este rango de periodos, son 2D y 3D. Asimismo, las líneas presentan diferentes direcciones; por lo tanto, no fue posible identificar una dirección predominante del *strike* regional, tal como se observa en los diagramas de rosas elaborados para cada rango de frecuencias. Sin embargo, en estas figuras resaltan algunas características importantes, entre ellas: la posible rotación de las líneas alrededor del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes. Esta rotación de direcciones comprende orientaciones: NE-SO, en la ubicación del sistema de fallas La Reforma; E-O, al sur del sistema de fallas La Virgen y volcán del mismo nombre; NE-SO y N, entre los sistemas de fallas El Álamo y Reforma; NO-SE, a lo largo del sistema de fallas El Azufre y El Aguajito y N-S, al oeste del volcán La Virgen. Estas rotaciones delimitarían bordes entre bajas y altas resistividades, tal como sugieren [Bertrand et al. \(2012\)](#).



**Figura 5.3.** a) Ubicación referencial de los sondeos MT y estimación de la dimensionalidad y direccionalidad de la estructura utilizando el método de descomposición del tensor de impedancias propuestos por McNeice y Jones (2001), para rangos de periodos (T) entre: b) T entre 0.107 y 0.853 s; c) T entre 1.024 y 8.533 s; d) T entre 1.024 y 341.333 s. Los diagramas de rosas representan la dirección preferencial del *strike* regional de la estructura geoelectrica. 1= La Virgen; 2= El Azufre; 3= El Viejo; AG= caldera El Aguajito y RE= caldera La Reforma.

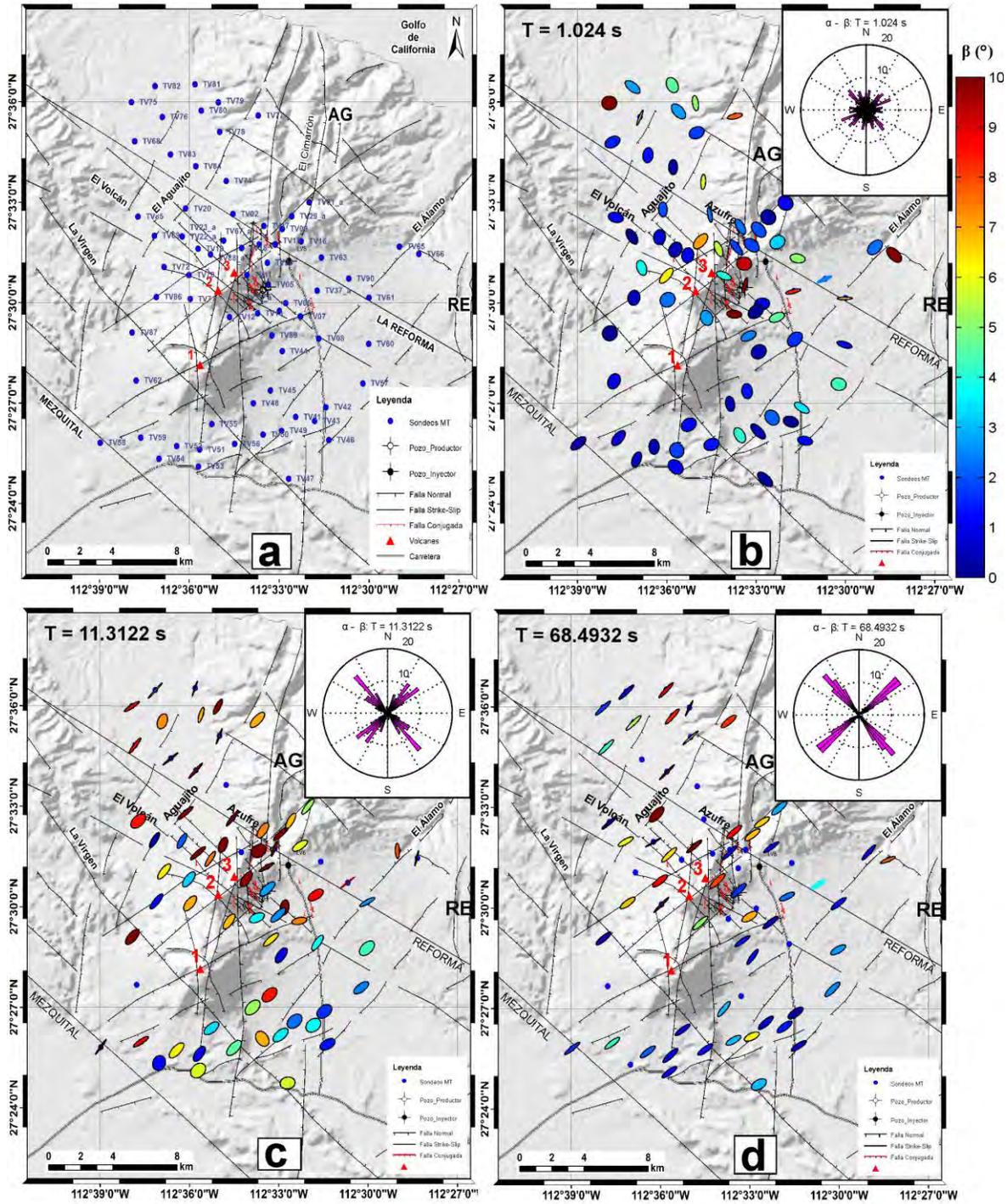
Para el periodo comprendido entre 1.024 y 341.333 s (Figura 5.3d), se observan claramente estructuras resistivas 2D y 3D; estas últimas, con mayor visibilidad alrededor de los volcanes El Azufre, el Viejo y al oeste de la caldera El Aguajito. En esta figura, en contraste con las anteriores (Figuras 5.3b y 5.3c), se muestran 2 direcciones preferenciales del *strike* regional, la primera con dirección N45°O y la segunda N45°E (diagrama de rosas, Figura 5.3d); éstas pueden estar correlacionadas a las direcciones preferenciales de los sistemas de fallas provenientes del Golfo de California. Aunque a estos periodos la posibles direcciones del *strike* se reducen a dos, es difícil asumir cual de ellos es el representativo, considerando, además que el desajuste es mayor (r.m.s. > 2.5), lo que indicaría una estructura 3D.

La evaluación de la dimensionalidad utilizando el tensor de fase fue realizado para 12 periodos, con rangos entre 0.01 y 341 s. La Figura 5.4 muestra 3 ejemplos de ellos y corresponden a periodos de 1.024 s (Figura 5.4b), 11.3122 s (Figura 5.4c) y 68.4932 s (Figura 5.4d). La simbología es la misma para estas figuras. La escala de colores representa la asimetría del tensor de fase (*skew*  $\beta$ ). Si  $\beta < 3$ , la estructura resistiva es interpretada como 2D; cuando  $\beta > 3$ , la estructura resistiva es 3D. El diagrama de rosas representada por la diferencia de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  ( $\alpha - \beta$ ) indican la dirección preferencial del *strike* regional.

Así, para el periodo de 1.024 s (Figura 5.4b), las elipses muestran que las estructuras geoelectricas son 2D y 3D. La estructura 2D se manifiesta, principalmente, alrededor del CVTV y por la orientación de los ejes principales de la elipse, se identifica la rotación de las mismas, confirmando los resultados obtenidos en la descomposición del tensor (ver Figuras 5.3b y 5.3c). Con relación a las elipses asociadas a la estructura 3D, éstas se ubican entre los volcanes El Azufre, El Viejo y al oeste de la caldera El Aguajito. Debido a la variabilidad en la dirección de los ejes principales de la elipse, no se identificó una dirección preferencial del *strike* regional, que se muestra en el diagrama de rosas de la misma figura.

Para el periodo de 11.3122 s (Figura 5.4c), es evidente el predominio de la estructura 3D ( $\beta$  entre 6 y 10) respecto a la estructura 2D ubicada, principalmente, al sur del volcán La Virgen. Comparando con la Figura 5.4b, se observan cambios bruscos en periodos muy cortos, lo que indicaría que en esta zona, la estructura geoelectrica es compleja. Además, los ejes principales de las elipses, ploteadas en el diagrama de rosas de la Figura 5.4 c, muestran que el *strike* regional tiene una dirección preferencial al NO acotada entre 30° y 40°.

Para los periodos largos, como es el caso de la Figura 5.4d (T = 68.4932 s), predominan las estructuras 2D y 3D. Las estructuras 2D se localizan, principalmente, al S y SO del CVTV, entre los sistemas de fallas El Mezquital, extremo sur de La Virgen y a lo largo del sistema de fallas El Álamo; mientras que al centro, N del CVTV y O de la caldera El Aguajito, predominan las estructuras 3D con valores de  $\beta > 6$ . Sin embargo, ambas estructuras, presentan elipses con los ejes principales orientados en dirección N45°E, tal como se muestra en el diagrama de rosas de  $\alpha - \beta$ .



**Figura 5.4.** a) Ubicación referencial de los sondeos MT y estimación de la dimensionalidad y direccionalidad de la estructura utilizando el método de tensor de fase propuesto por Caldwell et al. (2004), para periodos (T) de: b)  $T=1.024$  s; c)  $T=11.3122$  s y d)  $T=68.4932$  s. Los diagramas de rosas representan la direcciones preferenciales del *strike* regional calculado a partir del azimut del eje máximo principal de las elipses ( $\alpha-\beta$ ).

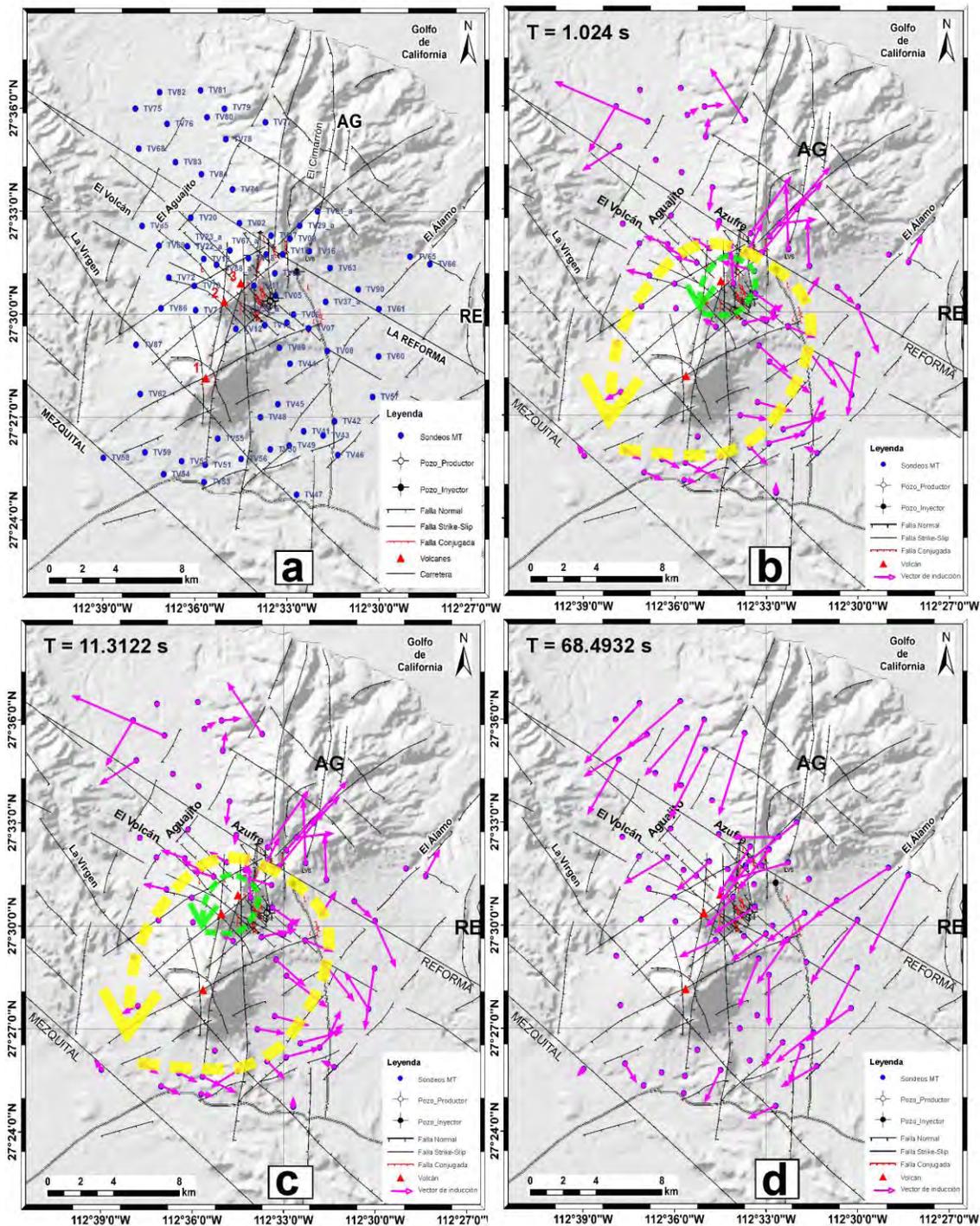
Además de la descomposición del tensor de impedancia y el tensor de fase, los vectores de inducción proveen información del *strike* regional de la estructura. Así, para efectos comparativos, los vectores de inducción magnética fueron calculados para los mismos periodos usados en el tensor de fase (1.024 s, 11.3132 s y 68.4932 s).

Los resultados muestran que a periodos cortos de 1.024 s (Figuras 5.5b) y 11.3122 s (Figura 5.5c), los vectores de inducción reflejan la complejidad de la estructura asociada al CVGTV, puesto que los vectores apuntan en todas las direcciones. Según Lee (2015), esta dispersión reflejaría anomalías conductivas cerca de la superficie. Sin embargo, la característica de rotación se muestra, claramente, alrededor del CVTV, entre los sistemas de fallas El Mezquital, extremo sur de La Virgen, El Álamo, El Azufre-Reforma, El Aguajito y extremo norte de La Virgen, confirmando los resultados obtenidos con la descomposición del tensor de impedancia (ver Figuras 5.3b y 5.3c) y con el tensor de fase (ver Figuras 5.4b y 5.4c).

A periodos largos de 68.4932 s (Figura 5.5d), los vectores de inducción apuntan hacia el SE, paralelo al CVGTV, sugiriendo que el *strike* regional de la estructura resistiva se orienta en dirección NO-SE, consistente con la dirección de los sistemas de fallas transformantes del Golfo de California.

En general, de la evaluación de la dimensionalidad de la estructura geoelectrica y la direccionalidad del *strike* regional, utilizando las tres metodologías, se resume las siguientes características principales:

- 1) A periodos cortos ( $T = 1.024$  s y  $T = 11.3122$  s), la estructura geoelectrica cambia rápidamente y predomina la estructura geoelectrica 2D y 3D. No presenta una dirección predominante del *strike* regional. La zona conductiva superficial se ubicaría por debajo en el CVGTV, específicamente por debajo del CVTV, donde además, se desarrollan las operaciones de explotación del recurso geotérmico. Los bordes de este conductor estarían limitados por los sistemas de fallas circundantes a este complejo volcánico; entre ellas, El Mezquital, El Álamo, El Azufre-Reforma y El Aguajito.
- 2) A periodos largos  $T = 68.4932$  s y  $T$  entre 1.024 y 341.333 s (ver Figura 5.3d), predomina la estructura 2D y 3D, pero a diferencia de los resultados obtenidos para periodos cortos, la estructura presenta 2 direcciones preferenciales del *strike* regional; el primero con dirección N45°E y el segundo con dirección N45°O que podrían ser atribuidos a los efectos de la costa del Golfo de California; sin embargo, debido a que en el CVGTV predominan las estructuras 2D y 3D, persiste la ambigüedad de la dirección del *strike* regional. A fin de minimizar los efectos que podrían ocurrir al seleccionar una de las direcciones preferenciales del *strike* regional se decidió aplicar el modelo de inversión 3D.



**Figura 5.5.** a) Ubicación referencial de los sondeos MT y estimación de la dimensionalidad y direccionalidad de la estructura utilizando el método de vectores de inducción siguiendo la convención de [Wiese \(1962\)](#), para periodos (T) de: b)  $T = 1.024$  s; c)  $T = 11.3122$  s y d)  $T = 68.4932$  s. Las flechas discontinuas en color amarillo y verde, representan la rotación de los vectores de inducción y apuntan fuera de la zona conductora.

## 5.4 INVERSIÓN TRIDIMENSIONAL (3D) DE LOS SONDEOS MT

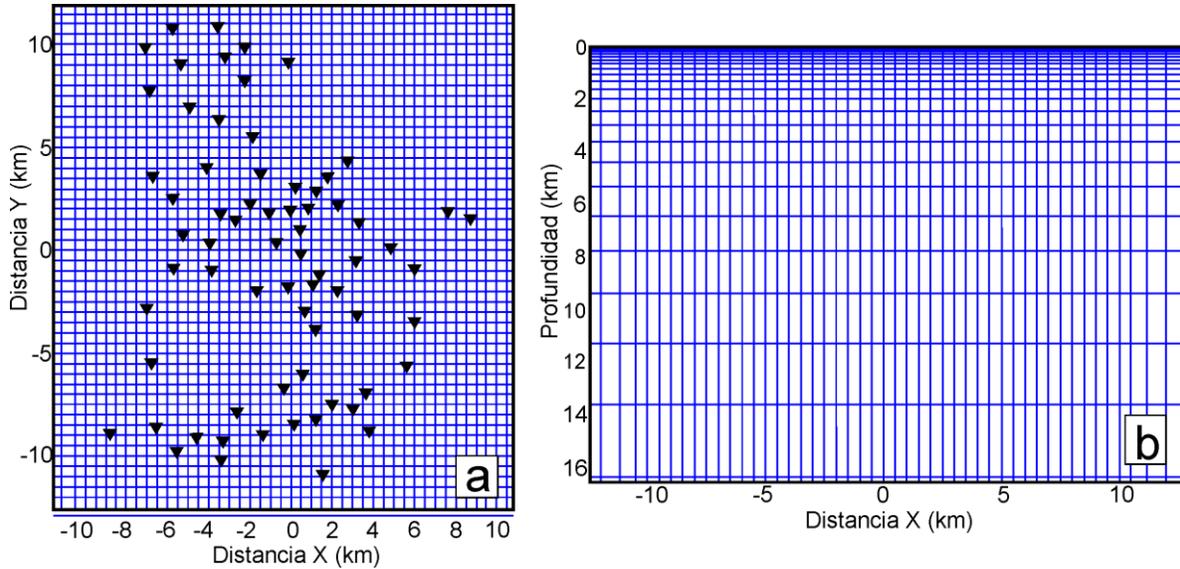
El análisis dimensional de los 70 sondeos MT muestra, en general, un comportamiento 2D y 3D (Figuras 5.3-5.5), estos resultados muestran la complejidad geológica y tectónica del CVGTV. A fin de representar, de la mejor manera, las variaciones de la resistividad en este campo volcánico y geotérmico, se procedió con la inversión 3D del total de datos MT (70) seleccionados previamente. La ubicación geográfica de estos sondeos MT son mostrados en la Figura 5.1.

### 5.4.1 Algoritmo de inversión 3D

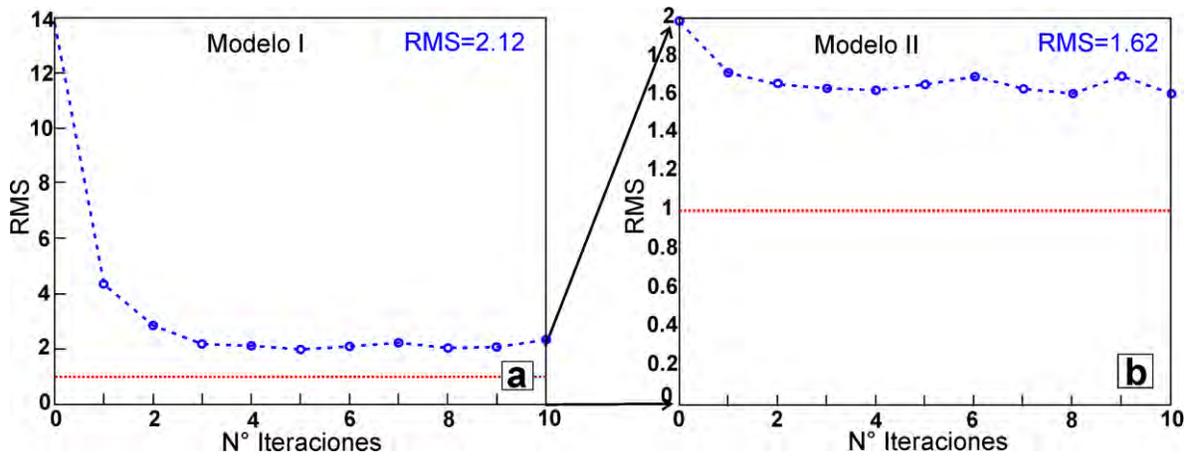
El algoritmo de inversión 3D utilizado en este estudio, es el desarrollado por Siripunvaraporn et al. (2005) y nombrado como WSINV3DMT. Este algoritmo utiliza la formulación del problema inverso donde el suavizado de la inversión es realizado en el espacio de los datos, en lugar del espacio del modelo (Siripunvaraporn y Egbert, 2000) lo que significa una reducción en el tiempo de cómputo requerido. La calidad de la inversión de este algoritmo está directamente correlacionada con el ajuste de los datos de entrada y los invertidos, los cuales son reflejados en el error cuadrático medio  $RMS \leq 1$ .

Así, la inversión 3D de los 70 sondeos MT analizados previamente se realizó utilizando todos los elementos del tensor de impedancia ( $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yy}$ ,  $Z_{yx}$ ) para 12 periodos en el rango de 0.01 a 200 s y con un error de fondo de 10 %. El semiespacio considerado para el modelo inicial fue de 100  $\Omega$ m. Asimismo, se construyó una malla compuesta por 58 bloques en la dirección x (E-O), 68 bloques en la dirección y (N-S) (Figura 5.6a) y 33 bloques en la dirección z (vertical) (Figura 5.6b). En total, los parámetros de los datos fueron 6720 y el número de los parámetros del modelo de 130152.

Después de realizar varias pruebas de inversión, cada una de ellas con 10 iteraciones, se seleccionaron dos modelos de resistividad con el menor desajuste (RMS) entre los datos de entrada y los invertidos (Figuras 5.7). Tal como se observa en las Figuras 5.7a y 5.7b, la relativa estabilidad y los menores desajustes de los valores de RMS ocurren en la iteración 4 y presentan valores de 2.12 (Modelo I) y 1.62 (Modelo II). Aunque ambos modelos presentan valores relativamente mayores al  $RMS \leq 1$ , establecido, como referencia, por el algoritmo de inversión, estos corresponden a las inversiones aceptables, considerando la heterogeneidad de los datos MT. Asimismo, ambos modelos presentaron una buena resolución para profundidades menores a 5 km; es decir, la máxima resolución, en profundidad, de la inversión magnetotelúrica 3D (RMT) es de  $\sim 5$  km.



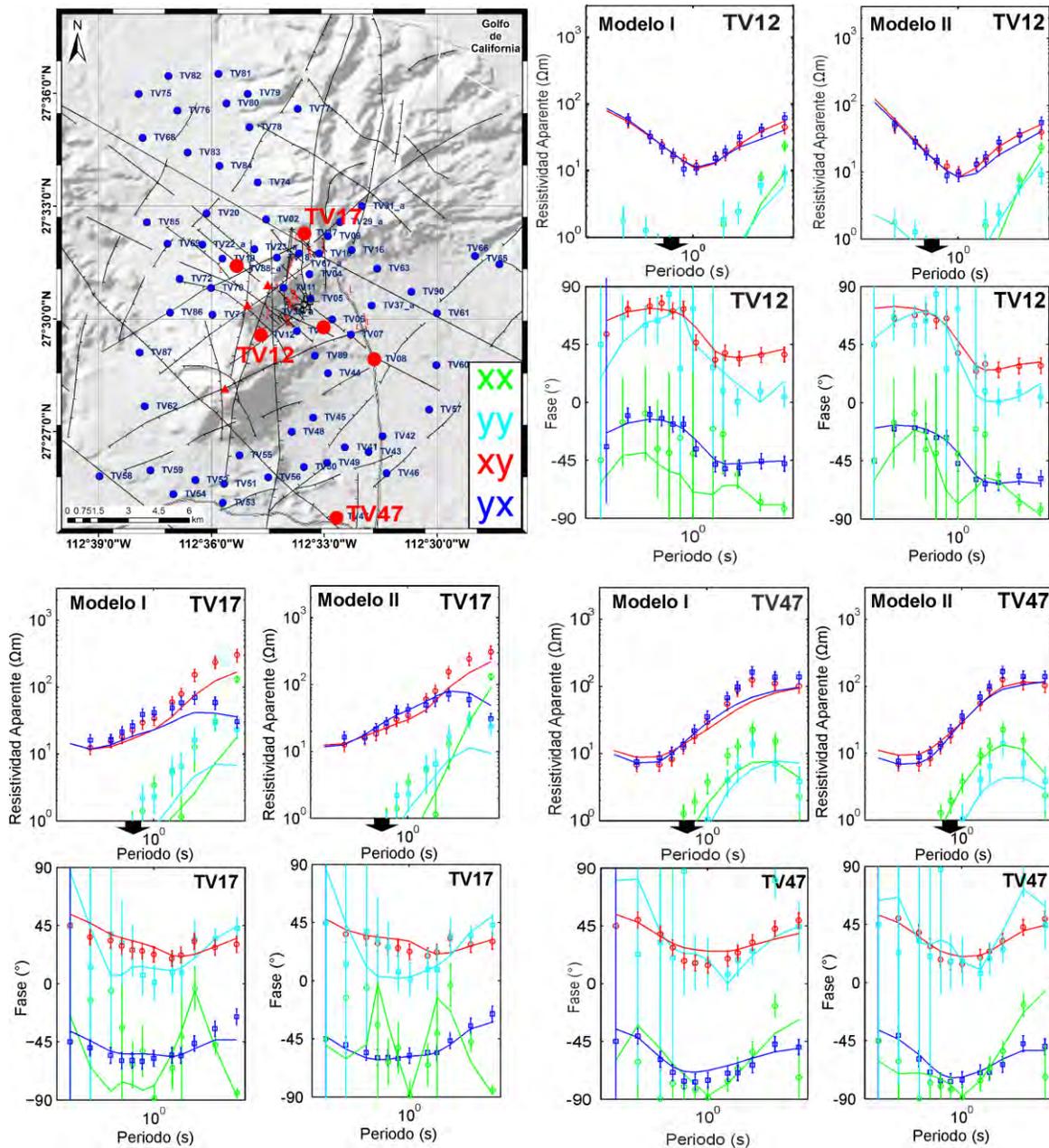
**Figura 5.6.** Malla de 58 x 68 x 33 celdas en direcciones: a) horizontales x (E-O), y (N-S) y b) vertical z (km) o profundidad.



**Figura 5.7.** Comparación de las curvas de convergencia para los Modelos I (a) y II (b). El menor desajuste (RMS) de 2.12 y 1.62 convergen en la iteración 4. Las líneas discontinuas de color azul representan la convergencia de los modelos y la línea discontinua de color rojo representa el límite del mejor ajuste establecido por el algoritmo de inversión.

En la [Figuras 5.8](#) se muestran ejemplos del ajuste de la inversión para los sondeos TV12, TV17 y TV47, utilizando los Modelos I y II. Comparando ambos resultados, la pequeña reducción del RMS en el Modelo II (RMS = 1.62) con relación al Modelo I (RMS = 2.12) se reflejan en el mejor ajuste de las curvas de la resistividad aparente y fase. Obsérvese que la inversión se ajusta a las componentes reales del tensor de impedancia; por lo tanto, la resistividad aparente y la fase son calculadas de los datos medidos y la respuesta del modelo.

A fin de identificar las similitudes y/o diferencias que pudiesen causar estos pequeños cambios del valor de RMS en la distribución de la resistividad, se consideró por conveniente analizar la estructura resistiva del CVGTV utilizando ambos modelos.



**Figura 5.8.** Modelos I y II: ejemplos comparativos del ajuste de los datos magnetotelúricos observados y los predichos (círculos celestes y verdes) de la inversión 3D para los sondeos TV12, TV19 y TV47. La resistividad aparente ( $\Omega m$ ) y el ángulo de fase ( $^{\circ}$ ) derivadas del tensor de impedancia magneotelúrica están representados por los colores verde (xx), celeste (yy), rojo (xy) y azul (yx) respectivamente.

## 5.5 ESTRUCTURA RESISTIVA DEL CVGTV

Para caracterizar y analizar la estructura resistiva del CVGTV, se elaboraron mapas y perfiles con la distribución de la resistividad en profundidad, considerando los dos modelos (I y II) obtenidos en la inversión magnetotelúrica 3D. Para una mejor comprensión de las anomalías de resistividad, éstas serán clasificadas como zonas resistivas (R: altas resistividades) y conductivas (C: bajas resistividades). Asimismo, considerando que la información sísmica y aeromagnética obtenida en este estudio, alcanzan profundidades mayores al límite de máxima resolución de la inversión MT (RMT~ 5km), así como el estudio magnetotelúrico de [Romo et al. \(2005\)](#) donde identificaron anomalías conductivas asociadas con posibles fuentes de calor a profundidades de 5 y 12 km, los mapas y perfiles de distribución de la resistividad fueron elaborados extendiéndolos hasta profundidades de 10 km.

### 5.5.1 Mapas de distribución de la resistividad: Modelos I y II

En la [Figura 5.9](#) y [Anexo 4](#) se presentan los mapas de distribución de la resistividad en profundidad, obtenidos con ambos modelos (I, II). Estos mapas fueron elaborados a profundidades de 0.05 km ([Figura 5.9a](#)), 0.5 km ([Figura 5.9b](#)), 1.0 km ([Figura 5.9c](#)), 4.4 km ([Figura 5.9d](#)), 5.3 km ([Figura 5.9e](#)) y 7.7 km ([Figura 5.9f](#)). Todos los mapas fueron sobrepuestos al mapa tectónico del CVGTV, con una transparencia del 30% a fin de visualizar las capas resistivas y su correlación con la tectónica de este campo volcánico y geotérmico. Asimismo, en la [Tabla 5.1](#), se resumen las características principales de la distribución de la resistividad obtenida de los diferentes mapas de la [Figura 5.9](#). Los resultados muestran lo siguiente:

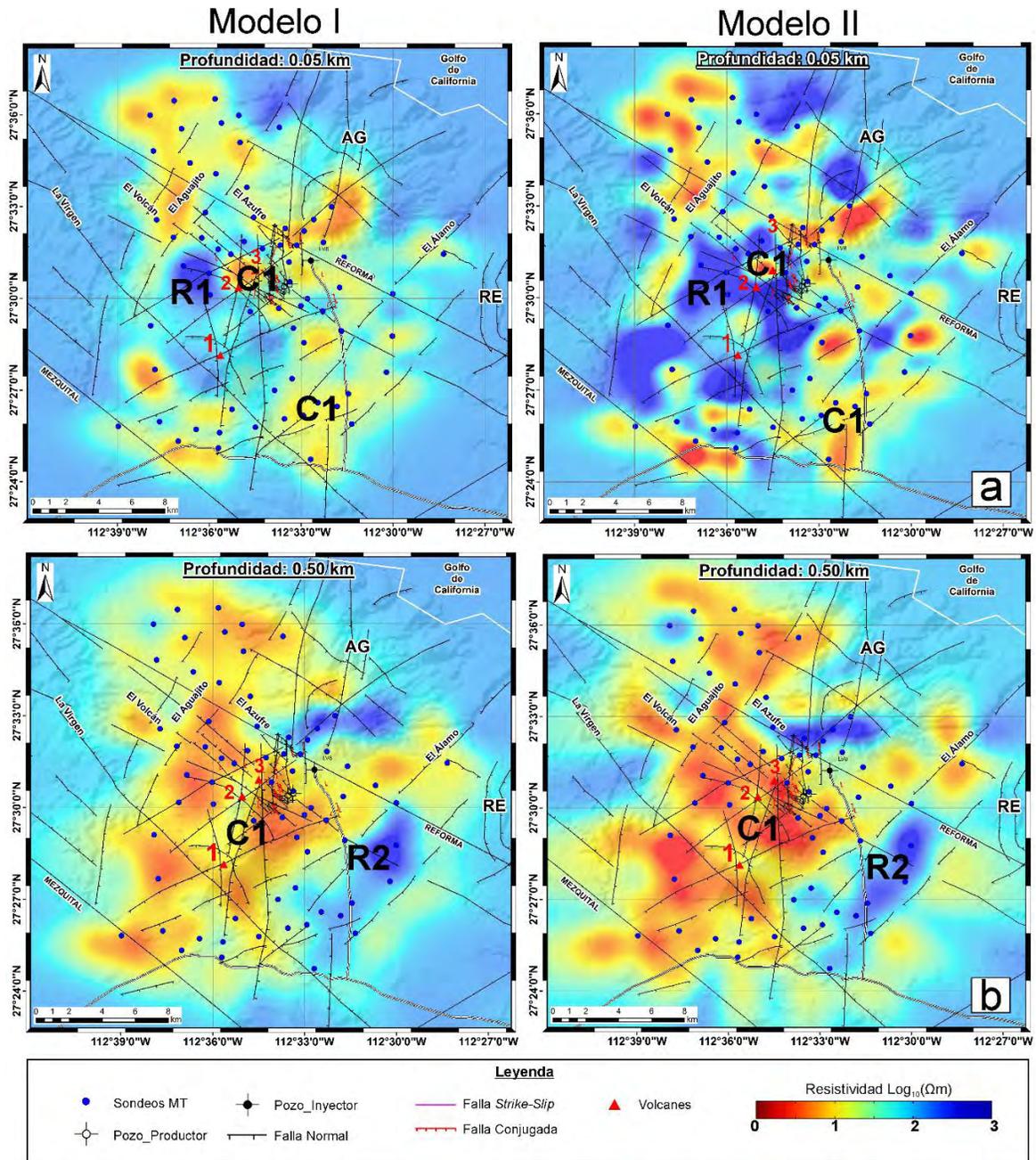
- 1) A la profundidad de 0.05 km ([Figura 5.9a](#)) se identificaron 2 zonas: una zona resistiva **R1** y otra zona conductiva **C1**. La primera zona resistiva **R1**, se localiza en la parte baja de los volcanes de La Virgen, El Azufre y al SO de la caldera El Aguajito. Se caracteriza por presentar resistividades altas entre 30 y 80  $\Omega\text{m}$  y se extienden hasta profundidades de 0.1 km. La segunda zona conductiva **C1**, se caracteriza por presentar resistividades anómalas, menores e iguales a 10  $\Omega\text{m}$  y se distribuyen por debajo del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV), entre los volcanes La Virgen y El Azufre, así como a lo largo de los sistemas de fallas Bonfil, Mezquital, La Virgen, El Aguajito, El Álamo, El Azufre-La Reforma. Según [Hernández et al. \(2010\)](#) y [Macías et al. \(2011\)](#), en la intersección de los sistemas de fallas El Azufre, La Reforma y El Cimarrón se evidencia un intenso fracturamiento superficial, alteración hidrotermal y presencia de fuentes termales y fumarolas. Similares características se presentan entre la intersección de los volcanes La Virgen y El Azufre, donde se ubica el sondeo MT12.
- 2) A la profundidad de 0.5 km ([Figura 5.9b](#)), la zona conductiva **C1** (anomalía de baja resistividad), se distribuye uniformemente, cubriendo la zona del campo volcánico y geotérmico, donde se llevan a cabo las operaciones de la explotación geotérmica.

Los límites de esta anomalía son los sistemas de fallas La Virgen, El Aguajito, El Azufre-La Reforma y El Álamo. A esta misma profundidad y hacia el S y SO de la caldera El Aguajito y SO del sistema de fallas El Álamo, se identificó la tercera zona de alta resistividad **R2**. Esta capa se caracteriza por presentar un incremento importante de la resistividad de 15 a 80  $\Omega\text{m}$ .

- 3) A la profundidad de 1.0 km (Figura 5.9c), la zona conductiva **C1** se reduce, básicamente, a la zona central del CVGTV, entre los volcanes La Virgen y El Viejo; mientras tanto, la zona resistiva **R2** abarca una mayor área con relación a la profundidad anterior de 0.5 km (Figura 5.9b) y la resistividad incrementó considerablemente hasta los 300  $\Omega\text{m}$ .
- 4) A la profundidad de 4.4 km (Figura 5.9d), la zona resistiva **R2** cubre casi toda la zona del CVGTV, exceptuando el extremo noroeste del volcán La Virgen y por debajo de los volcanes El Azufre y el Viejo, donde se identificaron las zonas conductoras **¿C2?** y **¿C3?** respectivamente. Tal como se observa en la Figura 5.9d, ambas zonas se caracterizan por presentar resistividades bajas, menores a 10 y 15  $\Omega\text{m}$ ; pero la zona conductiva **¿C3?**, a diferencia de **¿C2?**, solamente aparece en el Modelo II. Es preciso señalar que los signos de interrogación de **¿C2?** y **¿C3?** hacen referencia al reducido número de sondeos MT con los cuales fueron realizadas las inversiones 3D y a las ubicaciones cercana (**¿C2?**) y por debajo (**¿C3?**) de RMT.
- 5) A las profundidades de 5.3 km (Figura 5.9e) y 7.7 km (Figura 5.9f), se evidenciaron los mismos patrones de distribución de la resistividad observada en la Figura 5.9d. Mientras la zona conductiva **¿C2?**, en ambos modelos, desaparece a la profundidad de 7.7 km, la zona conductiva **¿C3?**, en el Modelo II, parece continuar a profundidades mayores de 7.7 km.

**Tabla 5.1** Distribución de resistividad en profundidad, correspondiente a los Modelos I y II e identificación de zonas resistivas y conductoras.

Zonas Resistivas y Conductoras	Modelos	Resistividad ( $\Omega\text{m}$ )	Profundidad (km)
R1	I y II	30-80	<0.1
C1	I y II	$\leq 10$	0.05-1.0
R2	I y II	15-300	1.5-10
¿C2?	I y II	$\leq 10$	2.5-5.5
¿C3?	II	$\leq 15$	>6.5



**Figura 5.9.** Mapas de distribución de la resistividad en profundidad de los Modelos I (lado izquierdo) y II (lado derecho) para las profundidades de: a) 0.05 km; b) 0.5 km; c) 1.0 km; d) 4.4 km; e) 5.3 km y f) 7.7 km. R1 y R2 son las zonas resistivas; C1, C2 y C3 representan las zonas conductivas. Obsérvese en el mapa (b), la zona conductiva C1 está limitada por los sistemas de fallas El Aguajito, El Álamo, El Mezquital, La Virgen y La Reforma-El Azufre (resaltados en color magenta).

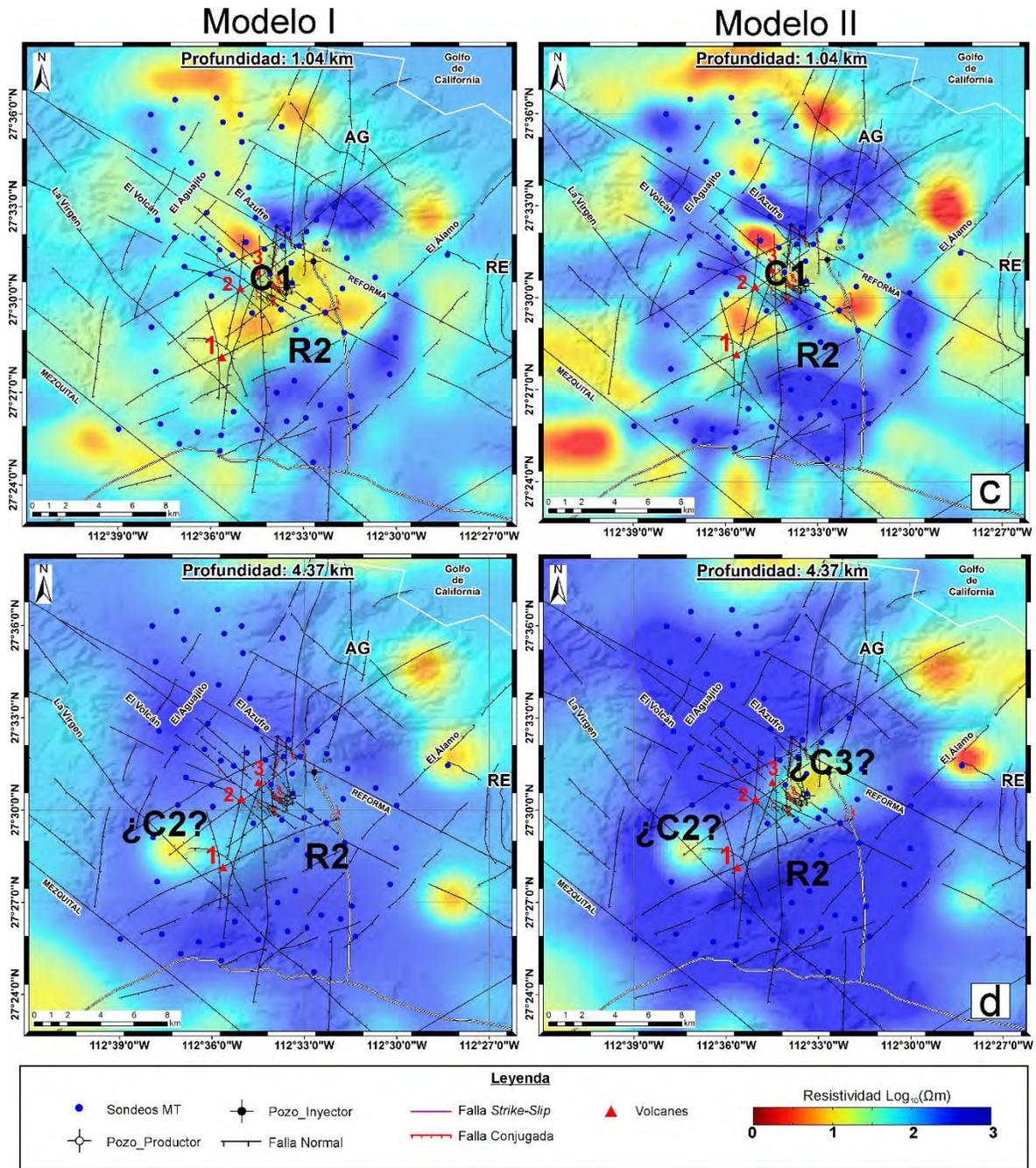


Figura 5.9. Continuación 1...

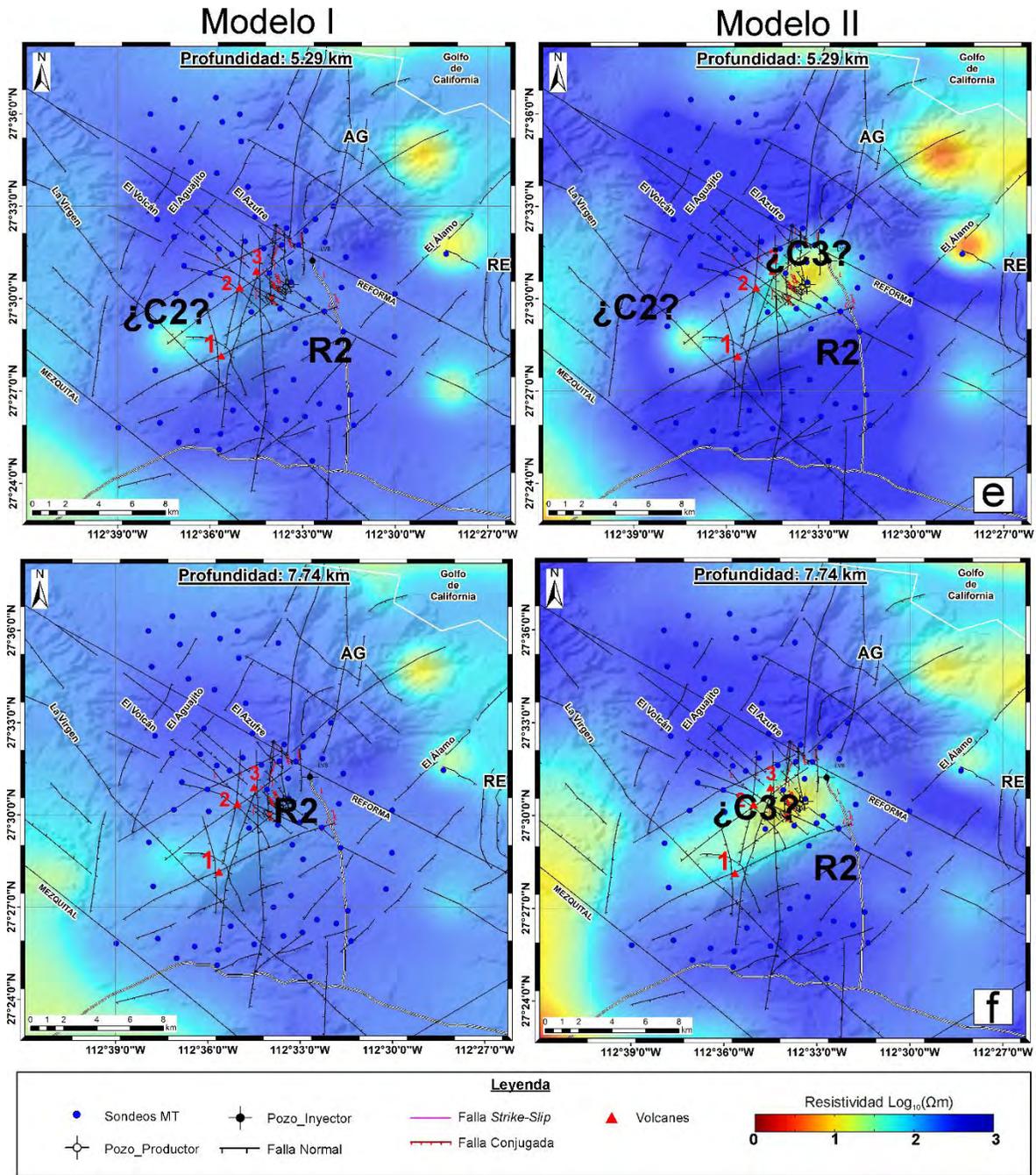


Figura 5.9. Continuación 2.

En general, los resultados muestran que a profundidades menores a 4.4 km (Figuras 5.9a, 5.9b, 5.9c), la distribución de la resistividad, obtenida con ambos modelos, son similares entre sí; sin embargo, por debajo de esta profundidad (4.4 km) (Figura 5.9d, 5.9e y 5.9f) y específicamente por debajo de los 5 km, ésta distribución difiere, particularmente, con la aparición tenue de la zona conductiva ¿C3? y que se intensifica a profundidades mayores a los 6.5 km. Esta diferencia de la respuesta de los modelos, al menos por debajo de los 5 km de profundidad, será analizada más adelante.

5.5.2 Distribución de la resistividad en profundidad: Modelos I y II

Para analizar la distribución de la resistividad en profundidad, primero se codificaron los principales sistemas de fallas regionales y locales del CVGTV (Figura 5.10, Tabla 5.2), estos van codificados desde F1 hasta F14, donde destacan los sistemas de fallas El Aguajito (F1 y F5), El Álamo (F7 y F11), La Reforma-El Azufre (F4), La Virgen (F8), El Volcán (F10) y El Mezquital (F14).

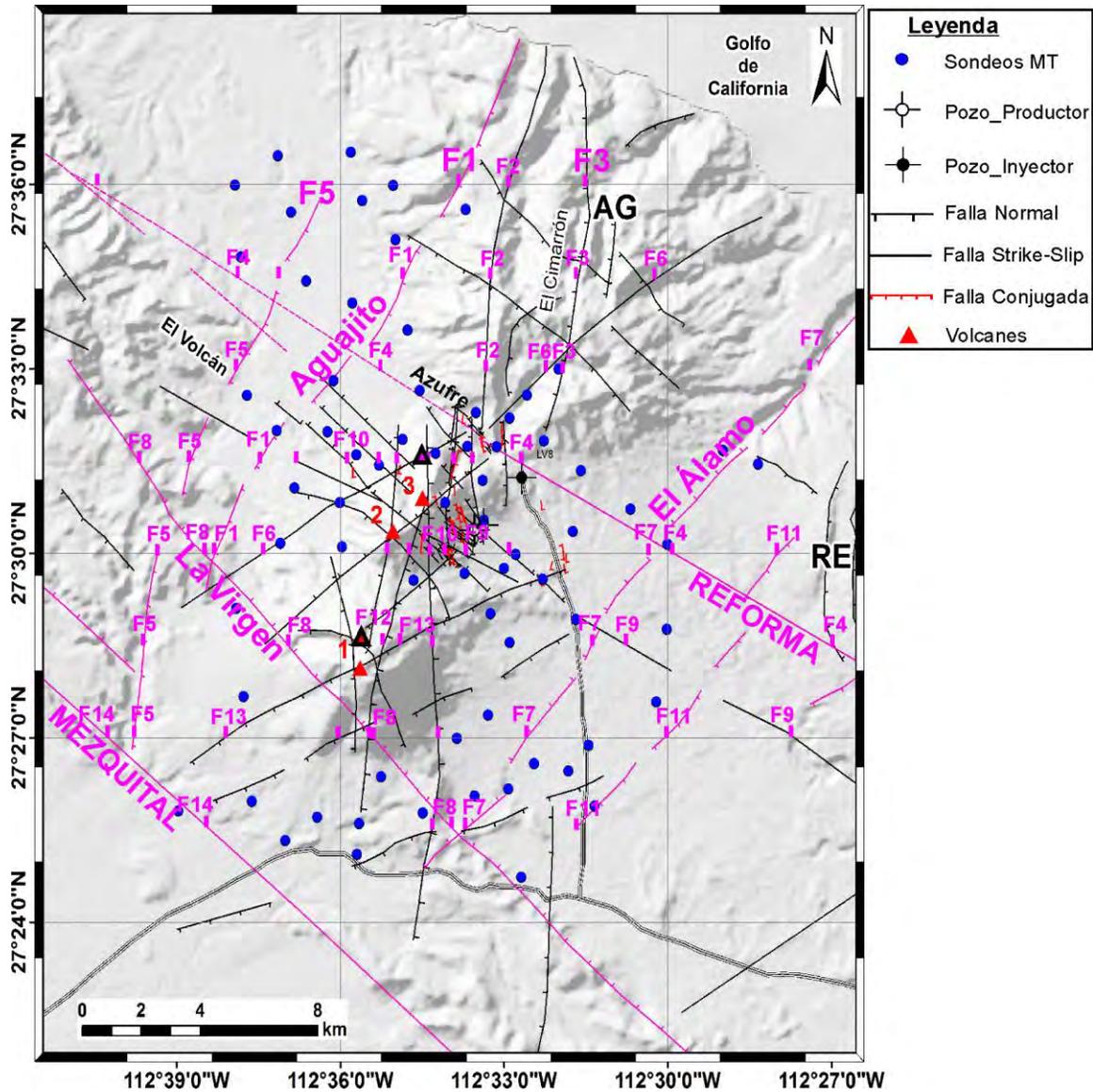


Figura 5.10. Codificación de los principales sistemas de fallas regionales y locales del CVGTV para su correlación con la distribución de la resistividad en profundidad.

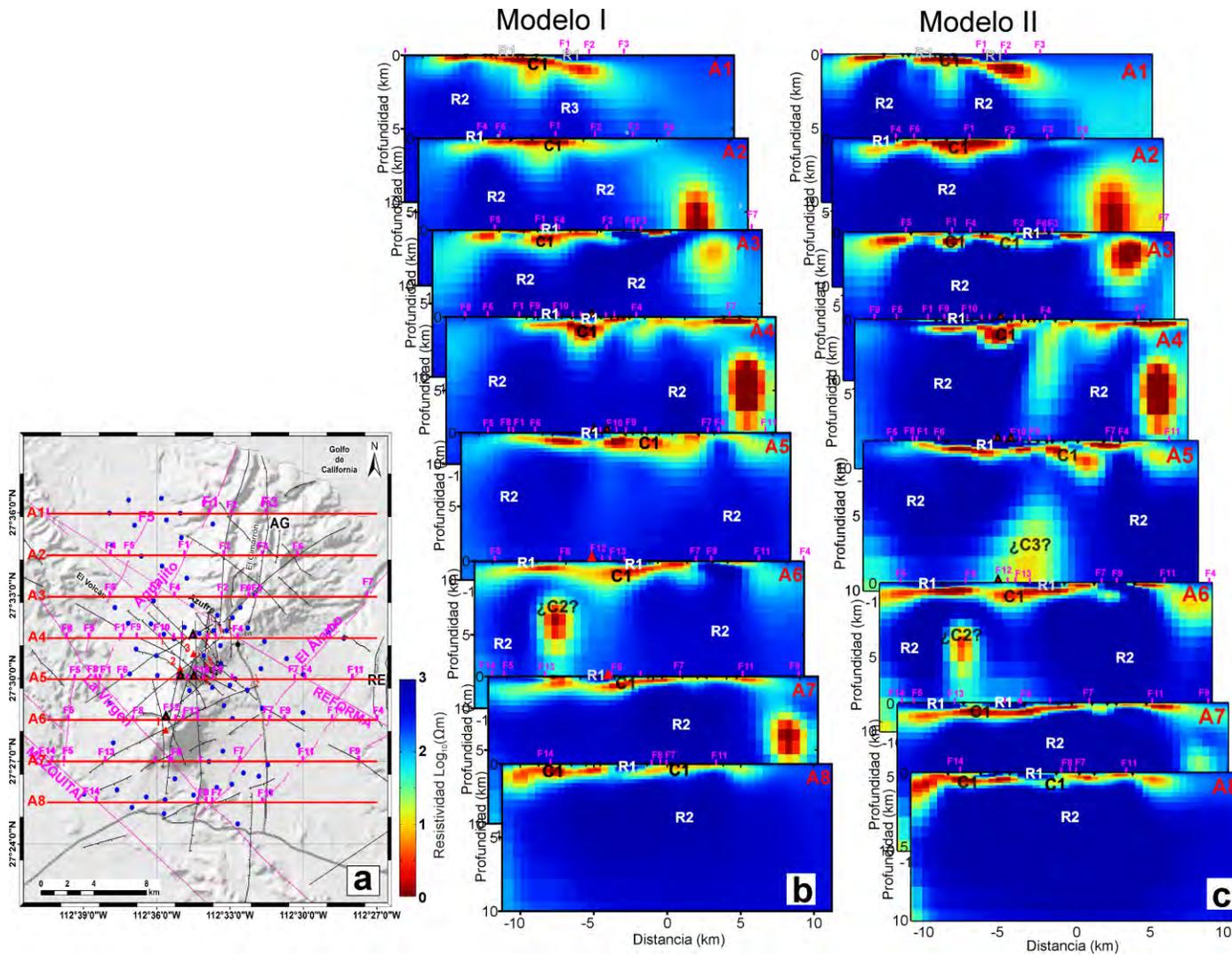
Código	Sistemas de fallas	Nombre abreviado
F1 y F5	El Aguajito	
F2 y F6	El Cimarrón	
F3	SN	
F4	La Reforma-El Azufre	SFR-SFA
F7 y F11	El Álamo	
F8	La Virgen	SFV
F9	SN	
F10	El Volcán	
F12	SN	
F13	SN	
F14	El Mezquital	SFM

**Tabla 5.2.** Códigos y nombres abreviados de los principales sistemas de fallas que cruzan los perfiles magnetotelúricos O-E y N-S representados en las Figuras 5.11 y 5.12. SN= sin nombre.

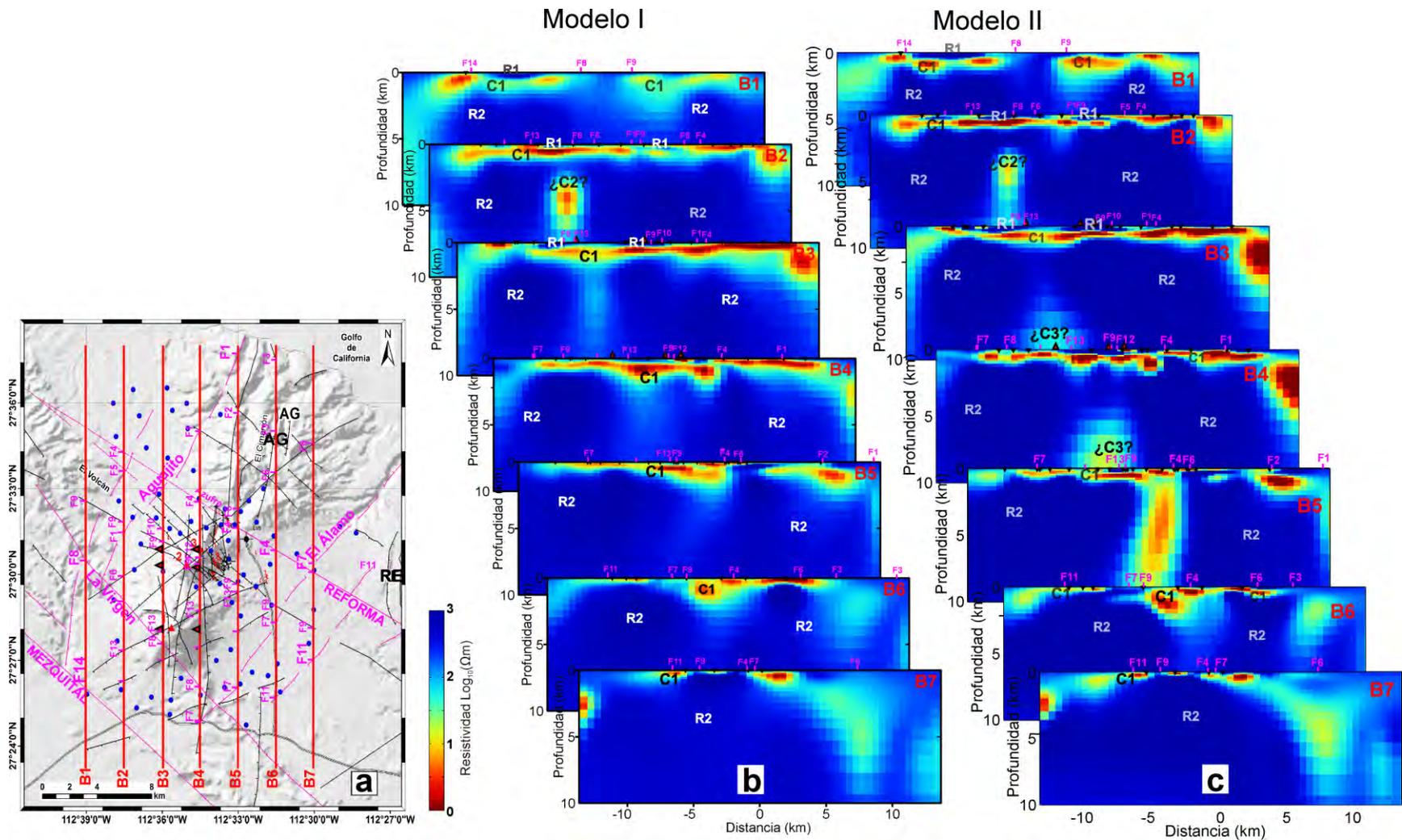
Posteriormente, se elaboraron 16 perfiles; 8 perfiles con dirección oeste-este (O-E) e identificados como A1-A8 (Figura 5.11); 7 perfiles, con dirección sur-norte (S-N) e identificados como B1-B7 (Figura 5.12) y tres perfiles con dirección suroeste-noreste (SO-NE) (Figuras 5.13-5.15); estos tres últimos fueron elaborados considerando los perfiles A-A' y B-B' de Romo et al. (2005)(Figuras 5.13 y 5.14) y de Benton et al. (2011) (Figura 5.15)

Cada uno de los perfiles en las direcciones O-E (A1-A8) y S-N (B1-B7), elaborados con ambos modelos y presentados en las Figuras 5.11 y 5.12, muestran una estrecha concordancia en la distribución de la resistividad hasta profundidades menores a 5 km. Así por ejemplo, en el perfil A6 (Figuras 5.11b y 5.11c) y B2 (Figuras 5.12b y 5.12c) las zonas conductivas **C1** y **¿C2?** se localizan a profundidades de 0.05-1.0 km (**C1**) y 2.5-5.5 km (**¿C2?**) respectivamente. La zona conductiva **¿C2?**, a diferencia de **C1**, ocupa un área pequeña, de aproximadamente 6 km<sup>2</sup>, por ello se visualiza, solamente, en estos perfiles. Similar característica presentaría la zona conductiva **¿C3?**, identificada a profundidades mayores a 6.5 km en los perfiles A5 y B4 del Modelo II (Figuras 5.11c y 5.12c).

Considerando la codificación de los sistemas de fallas (F1-F14) y la distribución de las resistividades, es evidente que las discontinuidades ocurren en las intersecciones de los principales sistemas de fallas; ejemplos de ellos pueden observarse en los perfiles A3-A8, donde las discontinuidades más resaltantes se correlacionan con la ubicación de los sistemas de fallas El Aguajito (F1 y F5), El Cimarrón (F2 y F6), El Azufre-La Reforma (F4), El Álamo (F7), La Virgen (F8) y El Mezquital (F14).



**Figura 5.11.** a) Mapa tectónico del CVGTV y ubicación de los perfiles en dirección O-E. b) Distribución de la resistividad en los perfiles O-E obtenidos del Modelo I y c) perfiles obtenidos del Modelo II.



**Figura 5.12.** Perfiles de la distribución de la resistividad en dirección S-N. a) Mapa tectónico del CVGTV y perfiles en dirección S-N. b) Perfiles obtenidos del Modelo I. c) Perfiles obtenidos del Modelo II.

La Figura 5.13 muestra los resultados obtenidos de la distribución de la resistividad, siguiendo la dirección del perfil A-A' de Romo et al. (2005) (Figura 5.13a). Como se puede observar en las Figuras 5.13b-5.13d, las zonas resistivas **R1**, **R2** y la zona conductiva **C1**, muestran distribuciones similares en los 3 perfiles. Así por ejemplo, la zona conductiva **C1** observada en el perfil de Romo et al. (2015) (Figura 5.13b), son identificadas, también en los perfiles elaborados con los Modelos I (Figura 5.13c) y II (Figura 5.13d), además muestran distribuciones laterales muy semejantes y alcanzan profundidades máximas de hasta 2 km. Con base en los estudios geológicos y estratigráficos del CVGTV, esta zona conductiva ha sido asociada a las capas de rocas sedimentarias y volcánicas de las formaciones Santa Lucía (SL) y Comodú (Co). Romo et al. (2005) sugieren, también, la presencia de otra zona conductiva ¿**Co?** a la profundidad de 5 km (Figuras 1.2a y 5.13b). Esta anomalía conductiva ha sido asociada con una posible fuente de calor y/o fluidos salinos. Sin embargo, a diferencia de la zona conductiva **C1**, en los perfiles de los Modelos I y II (Figuras 5.13c y 5.13d), no se observaron zonas anómalas conductivas similares a ¿**Co?**.

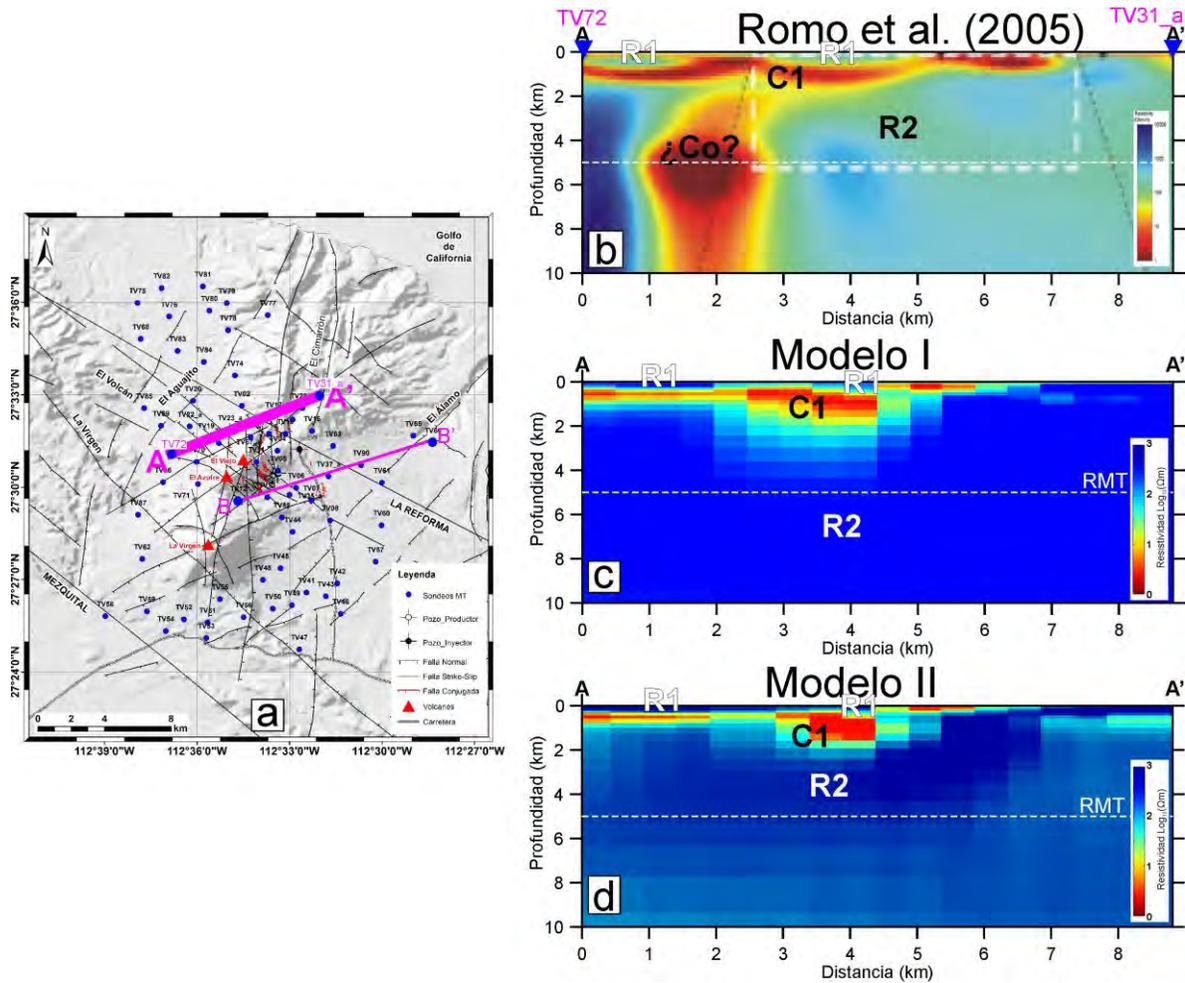
Asimismo, la Figura 5.14, muestra los resultados obtenidos de la distribución de la resistividad a lo largo del perfil B-B' de Romo et al. (2005) (Figura 5.15a). Similar a lo obtenido en el perfil A-A' (Figura 5.13), en los perfiles Figura 5.14b-5.14d se observan las zonas conductivas superficiales identificadas como **C1** y asociadas a la estratigrafía del CVGTV. Sin embargo, analizando estos 3 perfiles a profundidades mayores a 2 km, se observan, claramente, diferencias en la distribución de la resistividad. Así por ejemplo, Romo et al. (2005) identificaron la zona conductiva ¿**Co1?** a la profundidad aproximada de 12 km (Figura 1.2b y 5.14b); de acuerdo a los autores, esta anomalía conductiva estaría asociada con una fuente de calor y no tendría conexión con la anomalía **Co** identificada previamente en el perfil A-A' (Figuras 1.2a y 5.14b). Como es evidente, en los perfiles elaborados con los Modelos I (Figuras 5.14c) y II (Figura 5.14d), no se identificaron, con detalle, zonas conductivas a esos niveles de profundidad. Aunque en el Modelo II (Figuras 5.14d) se observa una posible zona conductiva ¿**C3?**, ubicada por debajo de los 6 km, no se estableció, si guarda o no correlación con ¿**Co1?**, debido a la diferencia de profundidades a las cuales fueron observadas (12 y 6 km), especialmente ¿**C3?**, puesto que esta posible zona conductiva se ubica por debajo del límite de resolución de la inversión 3D (RMT).

En la Figura 5.15 se muestra la distribución de la resistividad obtenida con los Modelos I (Figura 5.15b) y II (Figura 5.15c) de la inversión 3D, sobrepuesta al perfil estratigráfico SO-NE de Benton et al. (2011) (Figura 5.15a). En esta figura, se identificaron, con mayor detalle, las dos zonas resistivas (**R1** y **R2**) y 2 zonas conductivas (**C1** y ¿**C3?**). Estas zonas, con excepción de ¿**C3?**, presentan características similares en su distribución y correlación estratigráfica (Figuras 5.13b y 5.13c). Así, el subsuelo del CVGTV está conformado por:

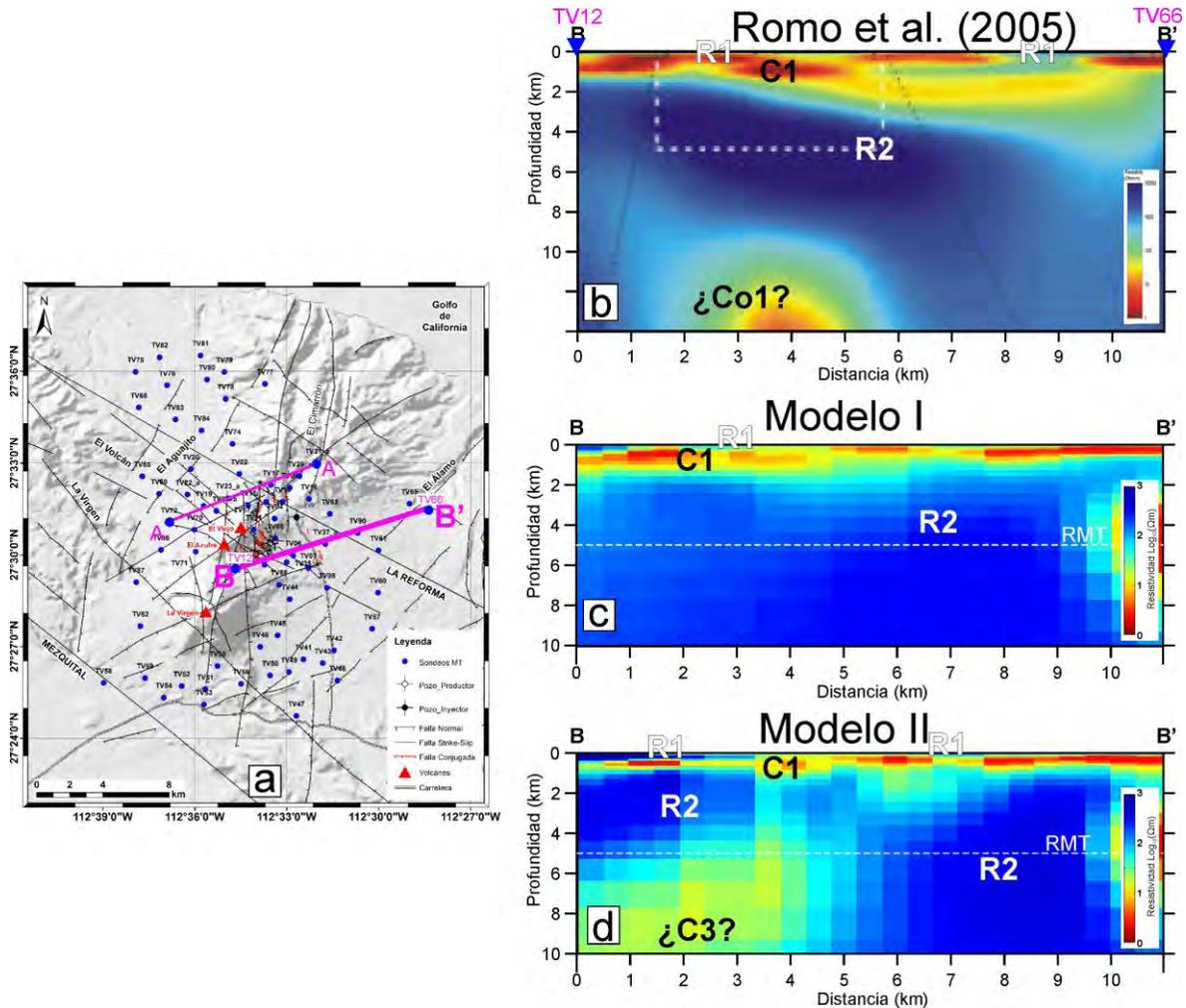
- 1) La zona superficial de alta resistividad **R1** (30-80  $\Omega$ m). Desde el punto de vista geológico-vulcanológico (Benton et al., 2011; Macías et al., 2011; Macías y Jiménez 2012, 2013), en esta zona **R1** afloran las rocas volcánicas (lavas basálticas, andesíticas,

dacíticas y depósitos de flujos de escombros) de los volcanes la Virgen, El Azufre y El Viejo.

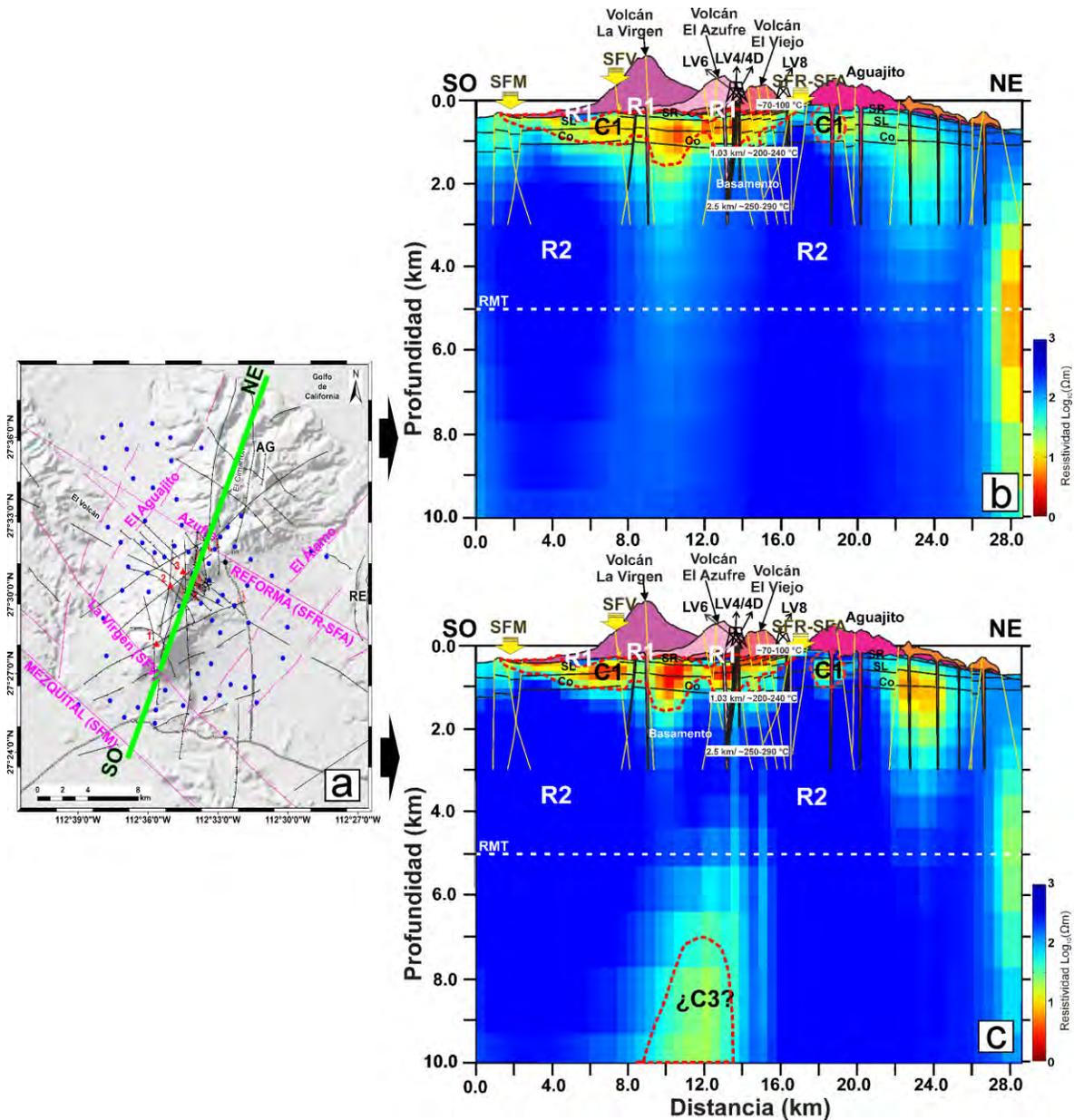
- 2) Entre las zonas resistivas **R1** y **R2**, se localiza la zona lateral conductiva **C1** ( $\rho_a \leq 10 \Omega\text{m}$ ), a profundidades de 0.05 a 1.0-1.5 km. De acuerdo a los estudios geológicos y vulcanológicos, esta anomalía estaría asociada con rocas sedimentarias y volcánicas de las secuencias Santa Rosalia (SR), las formaciones Santa Lucía (SL) y Comodú (Co). Estas rocas presentan un alto grado de fracturamiento y alteración hidrotermal, con temperaturas que fluctúan entre 70-100 °C y 200 °C (Verma et al., 2006; Hernández et al., 2010). Asimismo, la asociación mineralógica efectuada con los núcleos obtenidos durante la perforación del pozo LV6 (Hernández et al., 2010), evidenció la presencia de clorita a 1 km de profundidad aproximadamente. Este mineral, por su temperatura de formación (~240 °C) (Newman et al., 2008; Árnason et al., 2010; Cumming y Mackie, 2010), delinearía la interfase entre la zona conductora (**C1**) y el basamento granodiorítico de biotita (**R2**), donde ocurre la alteración propilítica (Verma et al., 2006); por lo tanto, se constituye, también como la cima del reservorio geotérmico de Las Tres Vírgenes (Hernández et al., 2010).
- 3) Por debajo de esta zona anómala de baja resistividad **C1**, a profundidades mayores a 1 km, se localiza la zona de alta resistividad **R2** (15-300  $\Omega\text{m}$ ) y forma parte del basamento granodiorítico de biotita. Se caracteriza por presentar temperaturas variables entre 90-100 °C, 250 °C (por la presencia del mineral biotita, podría sugerir temperaturas mayores a 320°C). En esta zona, también se identificaron minerales de clorita, mezcla de clorita-esmectita y epídota. La temperatura de formación de este último (epídota, ~240 °C), indicaría que el reservorio geotérmico se ubica en esta capa. La profundidad de este reservorio, aún no está establecido debido a que la máxima profundidad alcanzada durante la perforación del pozo LV6, fue de 2.5 km donde se estimó una temperatura de ~290 °C (Hernández et al., 2010).



**Figura 5.13.** a) Mapa tectónico del CVGTV y orientación SO-NE de perfil A-A'. Distribución de la resistividad obtenida con: b) la inversión 2D de Romo et al. (2005); c y d) obtenidas con la inversión 3D, Modelos I (c) y II (d). La línea discontinua en color blanco representa el límite de resolución (RTM) de la inversión 3D. R1 y R2 representan a las zonas resistivas y C1 a la zona conductiva superficial. ¿Co? es la anomalía conductiva identificada por Romo et al. (2005).



**Figura 5.14.** a) Mapa tectónico del CVGTV y orientación SO-NE del perfil B-B'. Distribución de la resistividad obtenida con: b) la inversión 2D de Romo et al. (2005); c y d) obtenidas con la inversión 3D, Modelos I (c) y II (d). La línea discontinua en color blanco representa el límite de resolución (RTM) de la inversión 3D. R1 y R2 representan a las zonas resistivas y C1 a la zona conductiva superficial. ¿Co1? es las anomalía conductiva profunda identificada por Romo et al. (2005).



**Figura 5.15.** a) Mapa tectónico del CVGTV y dirección SO-NE del perfil estratigráfico de Benton et al. (2011) donde se superpusieron las distribuciones de resistividades obtenidas con la inversión magnetotelúrica 3D. b) Modelo I y c) Modelo II. Los polígonos discontinuos en color rojo resaltan los límites de las zonas conductoras C1 y ¿C3?, la línea discontinua en color blanco el límite de resolución de la inversión magnetotelúrica 3D (RMT), las líneas continuas en color amarillo representan a los sistemas de fallas. SFM = sistema de fallas El Mezquital; SFV = sistema de fallas La Virgen; SFR-SFA = sistema de fallas La Reforma-El Azufre. LV6, LV4/4D son los pozos productores y LV8 el pozo inyector. R1 y R2 las zonas resistivas. SR= secuencias volcánicas Santa Rosalia, SL = Formación Santa Lucía y Co = Formación Comondú.

### 5.5.3 Similitudes y diferencias de la distribución de la resistividad en profundidad obtenidas con la inversión 3D (Modelos I, II) y la inversión 2D de Romo et al. (2005)

En general, hasta profundidades menores a 5.0 km, ambos modelos (I, II) de la inversión 3D y de la inversión 2D de Romo et al. (2005) muestran resultados muy similares, donde el comportamiento de la resistividad sigue el modelo clásico observado en otros campos volcánicos y geotérmicos, tales como los campos geotermales de Puga en India (Harinarayana et al., 2006), Dixie y Coso en Estados Unidos (Wannamaker et al., 2007; Newman et al., 2008), zona Volcánica de Taupo y Wairakei en Nueva Zelanda (Heise et al., 2007; Bibby et al., 2009), entre otros.

En este modelo, la zona lateral conductiva **C1** asociada a las rocas volcánicas y sedimentarias de las formaciones Santa Lucía y Comondú, se ubican por encima del reservorio geotérmico de alta resistividad **R2** y alta temperatura (hasta ~290 °C). Asimismo, entre estas capas se delinea una interfase de resistividad intermedia a alta, que actúa como la capa sello y los sistemas de fallas como el medio de transporte del fluido geotermal. Sin embargo, en esta zona de alta resistividad **R2** (Figura 5.15b), se muestra una zona conductiva anómala **¿C3?**, que asemeja una forma de *intrusión* que se localiza por debajo de los volcanes La Virgen, El Azufre y el Viejo, cuyos valores de baja resistividad ( $\rho_a \leq 15 \Omega\text{m}$ ) comparables a los obtenidos en la zona anomalía **C1**, no aparecen en el perfil de la Figura 5.15a; por lo tanto, se aprecia una diferencia marcada en los resultados de ambos Modelos I y II, al menos por debajo de los 5 km. Sin embargo, analizando los resultados obtenidos por Romo et al. (2005) en el perfil B-B' (Figura 5.14b), donde identifican una zona conductiva profunda (~ 12 km) por debajo de volcanes La Virgen, El Azufre y el Viejo y correlacionada con una posible fuente de calor, no descartaría, entonces, la posible zona conductiva **¿C3?**.

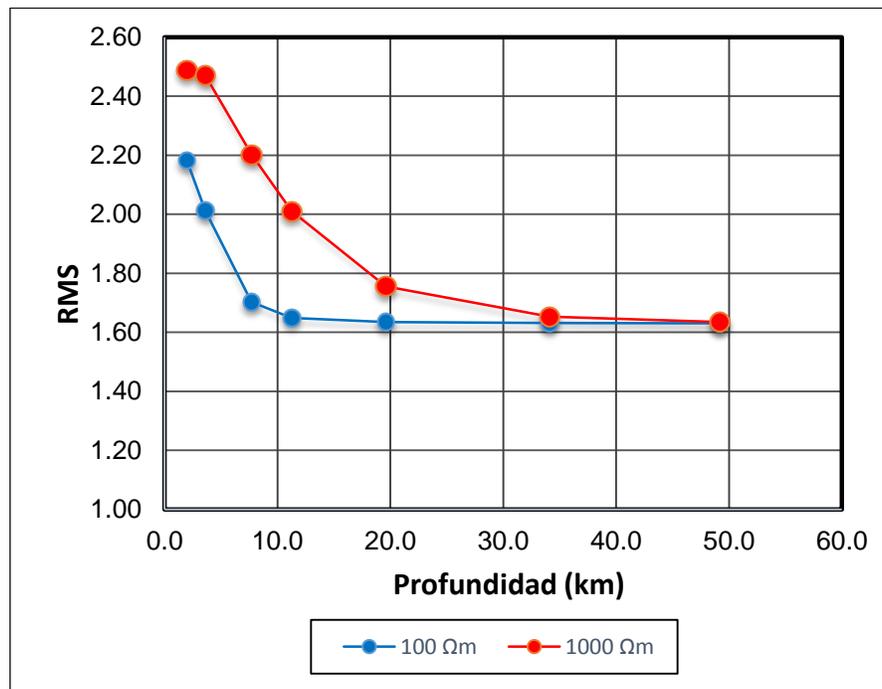
Debido a estas diferencias observadas, principalmente, a profundidades mayores a los 5 km y con el propósito de verificar si la zona conductiva anómala **¿C3?**, observada en los diferentes mapas y perfiles elaborados con el Modelo II son reales y podrían correlacionarse con la zona conductiva **¿Co1?** identificado por Romo e al. (2005) y/o, simplemente, podrían deberse a efectos asociados a la calidad de los datos, espaciamiento entre los sondeos MT y la baja resolución de la inversión 3D a estos niveles de profundidad (> 5 km) que generan *artefactos* de baja resistividad, se realizaron pruebas de resolución de la inversión 3D adicionales, especialmente para el Modelo II. En estas pruebas se tomaron en cuenta la estabilidad del valor del desajuste (RMS) con la profundidad y los cambios del valor del desajuste (RMS) con y sin la presencia de la posible zona conductiva **¿C3?**.

Sin embargo, es preciso señalar que al problema de la resolución baja o pobre a profundidades > 5 km, también estarían asociados otros factores como: la presencia de la anomalía conductiva superficial **C1**, que no permitiría observar los detalles de la variación de la resistividad a profundidades mayores a 5.0 km; el número de sondeos utilizados en la inversión y la ubicación de las posibles zonas conductivas **¿C3?** y **¿C2?**. Así por ejemplo, **¿C3?**, se localiza

en la zona donde los sondeos MT están, relativamente, separados, mientras que la anomalía conductiva ¿C2? estaría controlada, básicamente, por los sondeos TV62 y TV87 respectivamente.

#### 5.5.4 Pruebas de la resolución del modelo de inversión 3D

En la Figura 5.16, se presenta la gráfica de la relación del desajuste (RMS) con la profundidad de investigación. En esta prueba, se consideraron 2 modelos iniciales; la primera, nuevamente con 100  $\Omega\text{m}$  (considerado en la inversión 3D) y la segunda con 1000  $\Omega\text{m}$ . Los resultados muestran que las variaciones del modelo de resistividad inicial no afectaron, significativamente, en el valor del RMS; por el contrario, corroboraron que la resolución de la inversión 3D están limitadas hasta una profundidad máxima de 5 km; por lo tanto, se torna difícil aseverar o descartar la existencia de la anomalía conductiva ¿C3?.

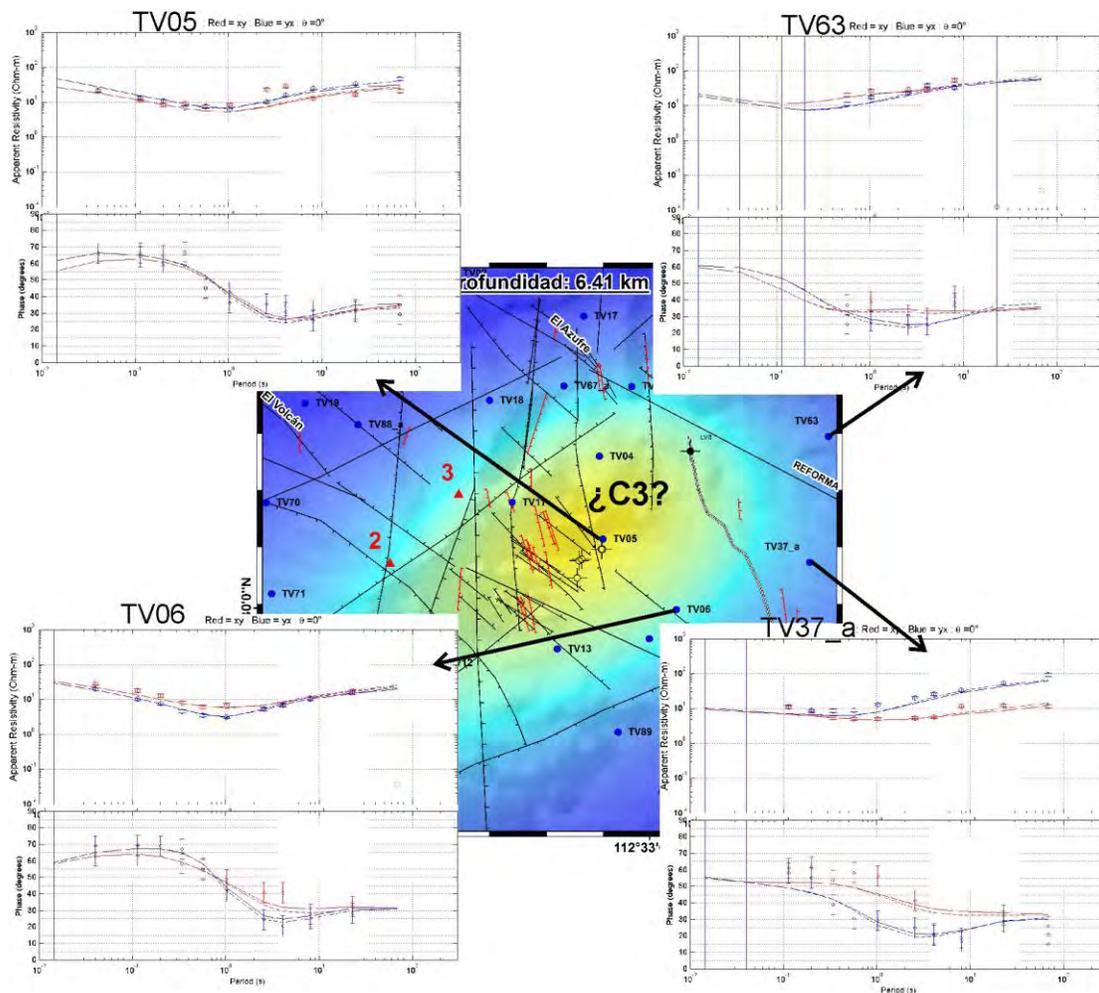


**Figura 5.16.** Evaluación del ajuste del modelo de inversión 3D (RMS) con relación a la profundidad y las resistividades máximas de 100 y 1000  $\Omega\text{m}$ .

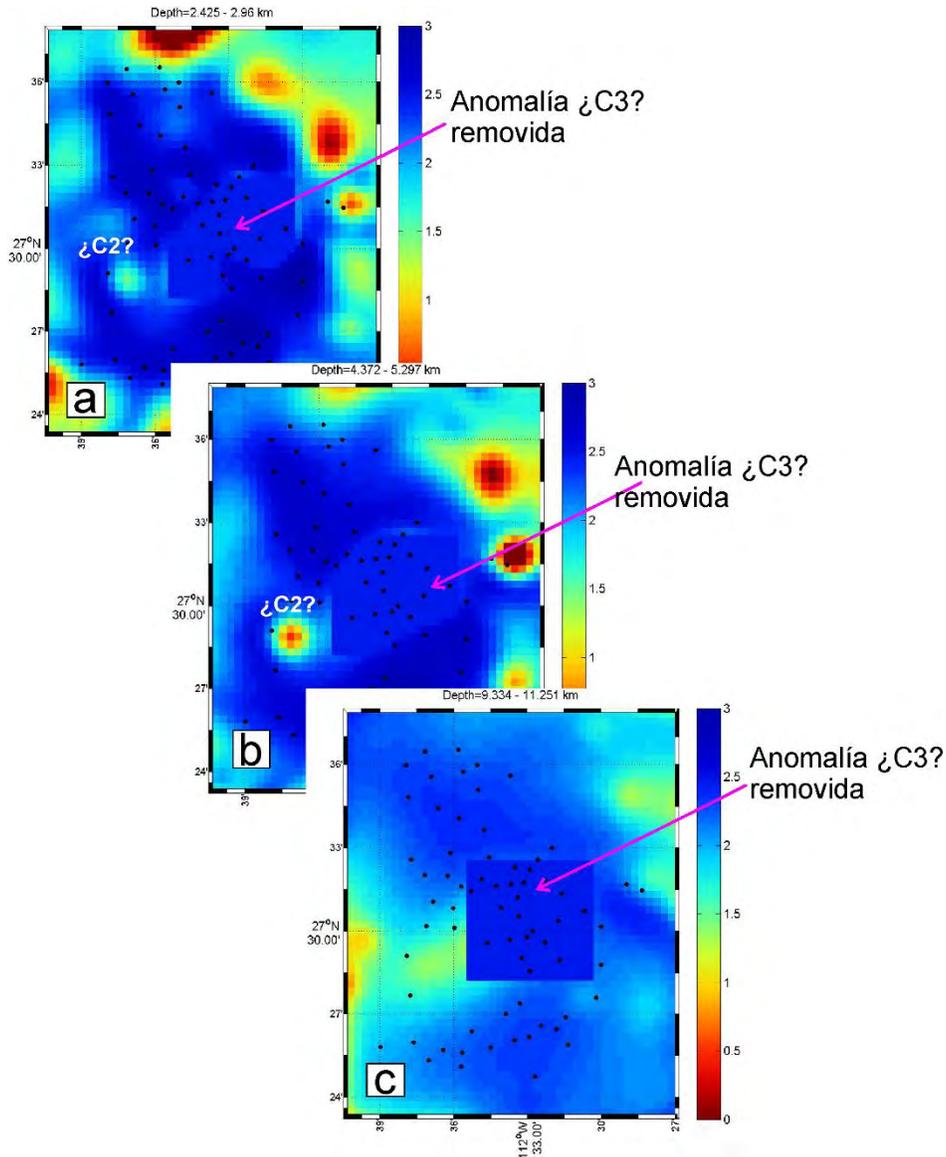
Otra prueba realizada, fue editando el modelo de inversión 3D. En esta edición se removió la anomalía conductiva ¿C3? y se limitó la resistividad a 300  $\Omega\text{m}$  para profundidades entre 2.4 y 11.4 km. Los resultados mostraron cambios muy pequeños entre el valor del desajuste (RMS) de los datos del modelo de inversión y del modelo editado (RMS ~1.6307-1.6362), corroborando, una vez más, que la buena resolución de la inversión 3D está acotada a profundidades máximas de ~ 5 km; por lo tanto, para incrementar o mejorar la resolución a profundidades mayores a 5 km, se requerirá realizar trabajos complementarios; entre ellos, el

incremento del número de sondeos y mayor tiempo de registro MT, alrededor y sobre las anomalías ¿C2? y ¿C3?, además de otros estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos con mayor detalle.

En la Figura 5.17 se muestran ejemplos gráficos del desajuste de ambos modelos (inversión y editado) para los sondeos TV05, TV06, TV37\_a y TV63 que rodean a la zona conductiva ¿C3?. Como se puede observar en la figura, el ajuste de las curvas de resistividad, tanto del modelo de inversión (líneas continuas) así como el editado (líneas discontinuas) son muy similares, lo que sugiere que no hay cambios en la respuesta de la inversión con o sin la presencia del conductor ¿C3?. Este mismo comportamiento se observa en los mapas de distribución de la resistividad en profundidad (Figura 5.18).



**Figura 5.17.** Ejemplos del ajuste del modelo de inversión (Modelo II) (líneas continuas) y el editado (líneas discontinuas) para los sondeos TV05, TV06, TV37\_a y TV63. En el centro, se muestra el mapa de resistividad a la profundidad de 6.4 km, la ubicación espacial de los sondeos y la anomalía conductiva ¿C3?.



**Figura 5.18.** Mapas de distribución de resistividad para las profundidades de: a) 3 km, b) 5.3 km y c) 11.3 km, donde fue removida la anomalía conductiva ¿C3?.

### 5.5.5 Correlación de los estudios sísmológicos, geológico-estratigráficos y la temperatura con la distribución de la resistividad del CVGTV: Modelos I y II

Para analizar, las características sísmicas, geológico-estratigráficas, variación de la temperatura y la distribución de la resistividad del CVGTV (utilizando ambos modelos MT: I y II), cuya profundidad máxima de resolución de la inversión magnetoelétrica 3D (RMT) es de  $\sim 5$  km, se consideró conveniente incrementar la profundidad de correlación hasta los 10 km, debido a que la sísmica del CVGTV ocurre hasta profundidades variables entre 6.5 y 11 km (Figuras 3.12 y 5.22), los estudios MT previos (Figuras 1.2, 5.13b y 5.14b) sugieren la existencia de anomalías conductivas hasta profundidades de 6 y 12 km, los estudios geológico-

vulcanológicos de Macías et al. (2011), sugieren que el magma del CVTV se habrían generado a profundidades entre 7 y 9 km. También se tomó en consideración la correlación de estudios realizados por Heise et al. (2007) (Figura 5.19a), Newman et al. (2008) (Figura 5.19b) y Baruraharjo (2012) (Figura 5.19c) en la zona volcánica de Taupo (Nueva Zelanda) y los campos geotermales de Coso (Estados Unidos) y Kamojang (Indonesia). Según estos autores, existe una estrecha correlación entre la sismicidad, resistividad, geología y temperatura de estos campos geotérmicos. Así por ejemplo, la ausencia de sismicidad estaría asociada con la zona de transición frágil-ductil; además, por debajo de esta zona de transición, identificaron anomalías de baja resistividad que asociaron a una fuente de calor. Por otro lado, Bibby et al. (1995) consideran que la máxima profundidad a la que ocurren los sismos marcaría, también, la máxima profundidad a la cual se mantendría la convección del agua. Smith y Bruhn (1984) y Hill et al. (1993), a su vez, concluyen que la base de la zona sismógena o zona de transición, puede ser considerada como una isoterma, dado que la temperatura de la transición a un comportamiento dúctil es de ~350 °C.

Con este fin, los resultados de los estudios del CVGTV fueron integrados en los perfiles A5 y A6 elaborados en direcciones O-E (Figuras 5.20b y 5.20c) y en los perfiles elaborados en dirección SO-NE de Romo et al. (2005) (Figura 5.21) y Benton et al. (2011) (Figura 5.22).

#### 5.5.5.1 Sismicidad y resistividad

Como se pueden ver en los perfiles A-A' y B-B' de Romo et al. (2005) (Figuras 5.20 y 5.21), elaborados con dirección SO-NE, se observa que la sismicidad se localiza en el basamento granodiorítico y por debajo de la zona conductiva **C1**. Además, la sismicidad se presenta, básicamente, en la zona central del campo geotérmico, donde está ubicado el reservorio geotérmico (~1.03-2.5 km) y profundidades de 1.0 a 6.5 km aproximadamente; mientras que a ambos extremos, entre las referencias de los sistemas de fallas El Mezquital (SFM) y La Reforma-Azufre (SFR-SFA) y por debajo de la caldera El Aguajito, la profundidad de los sismos es mayor a 6.5 km. Estos límites de sismicidad en profundidad, delinearían la posible zona de transición frágil-ductil (ZT) en el CVGTV. Esta delineación inferida de ZT mostrada previamente en las Figura 3.12, presenta la forma de un anticlinal en la zona central del CVGTV y por debajo del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (La Virgen, El Azufre y El Viejo), sugiriendo que por debajo de éste, habría algún cuerpo anómalo que reduce, significativamente, la ocurrencia de sismos a mayor profundidad. En este contexto, por la ubicación en profundidad (> 6.5 km) y la forma que adquiere (anticlinal), este cuerpo anómalo podría tratarse de la zona conductiva **¿C3?** (Figura 5.15c). Asimismo, observando la distribución de la sismicidad en el perfil B-B' de Romo et al. (2005) (Figura 5.21c) es evidente que la anomalía **¿Co1?** se ubica en la zona asísmica, aunque a mayor profundidad (~12 km) que **¿C3?** (> 6.5 km); sin embargo, ambas anomalías comparten similitudes en la forma y la ubicación por debajo del Complejo Volcánico de las Tres Vírgenes (CVTV).

Mientras tanto, en el perfil estratigráfico de [Benton et al. \(2011\)](#) ([Figuras 5.21b y 5.21c](#)), se observa una estrecha correlación entre la distribución de la sismicidad y la resistividad, así como entre las discontinuidades de la resistividad y los principales sistemas de fallas. Así, la sismicidad se localiza por debajo de la zona conductiva **C1**, específicamente en la zona de alta resistividad **R2**, que corresponde al basamento granodiorítico del CVGTV. Asimismo, la sismicidad disminuye considerablemente ante la cercanía de las posibles anomalías conductivas  $\zeta\text{C2?}$  (perfil A6) ([Figuras 5.19b y 5.19c](#)) y  $\zeta\text{C3?}$  (perfil A5) ([Figura 5.19c](#)) y se torna asísmico en la zona central de dichas anomalías.

Con relación a la anomalía conductiva  $\zeta\text{C2?}$ , cuya presencia aún es cuestionable debido al número reducido de sondeos MT cercanos con los cuales fue realizada la inversión, es muy posible inferir su existencia entre los 2.5 y 5.5 km de profundidad, puesto que a estos niveles de profundidad se presenta una ausencia de sismicidad, mientras que por debajo y alrededores de dicha zona anómala, la sismicidad está presente hasta profundidades de  $\sim 8$  km ([perfil A6](#), [Figuras 5.19b y 5.19c](#)). Además de la localización de la sismicidad, los estudios de atenuación de las ondas de coda ([Figuras 3.20-3.22](#)) y *valor b* ([Figuras 3.30-3.31 y 5.21b y 5.21c](#)), parecen sugerir la presencia de esta anomalía ubicada al NO del cráter del volcán La Virgen y por debajo de la intersección de los sistemas de fallas La Virgen y el sistema NE-SO. A diferencia de esta anomalía conductiva  $\zeta\text{C2?}$ , la anomalía  $\zeta\text{C3?}$ , se ubica por debajo del límite de máxima profundidad de la resolución de la inversión magnetotelúrica 3D (RMT), lo cual limita, considerablemente, su correlación e interpretación; sin embargo es innegable la ausencia de sismicidad en la posible ubicación de la zona conductiva  $\zeta\text{C3?}$ .

#### 5.5.5.2 Geología-estratigrafía y la resistividad

Tal como se explicó en la sección 5.5.2, la distribución de la resistividad en profundidad, presenta una estrecha correlación con la estratigrafía del CVGTV. Esta característica fue observada, también, por [Romo et al. \(2005\)](#) ([Figuras 1.2, 5.14b y 5.15b](#)). La sobreposición de la distribución de la resistividad correspondiente a los Modelos I ([Figura 5.20b](#)), y II ([Figura 5.20c](#)), sobre los perfiles estratigráficos de [Benton et al., 2011](#), considerando solamente, hasta la profundidad máxima alcanzada durante la perforación del pozo LV6 ( $\sim 2.5$  km) ([Hernández et al., 2010](#)), sugieren 2 zonas resistivas (**R1** y **R2**) y una conductiva (**C1**), además de 2 interfaces entre **R1-C1** y **C1-R2**.

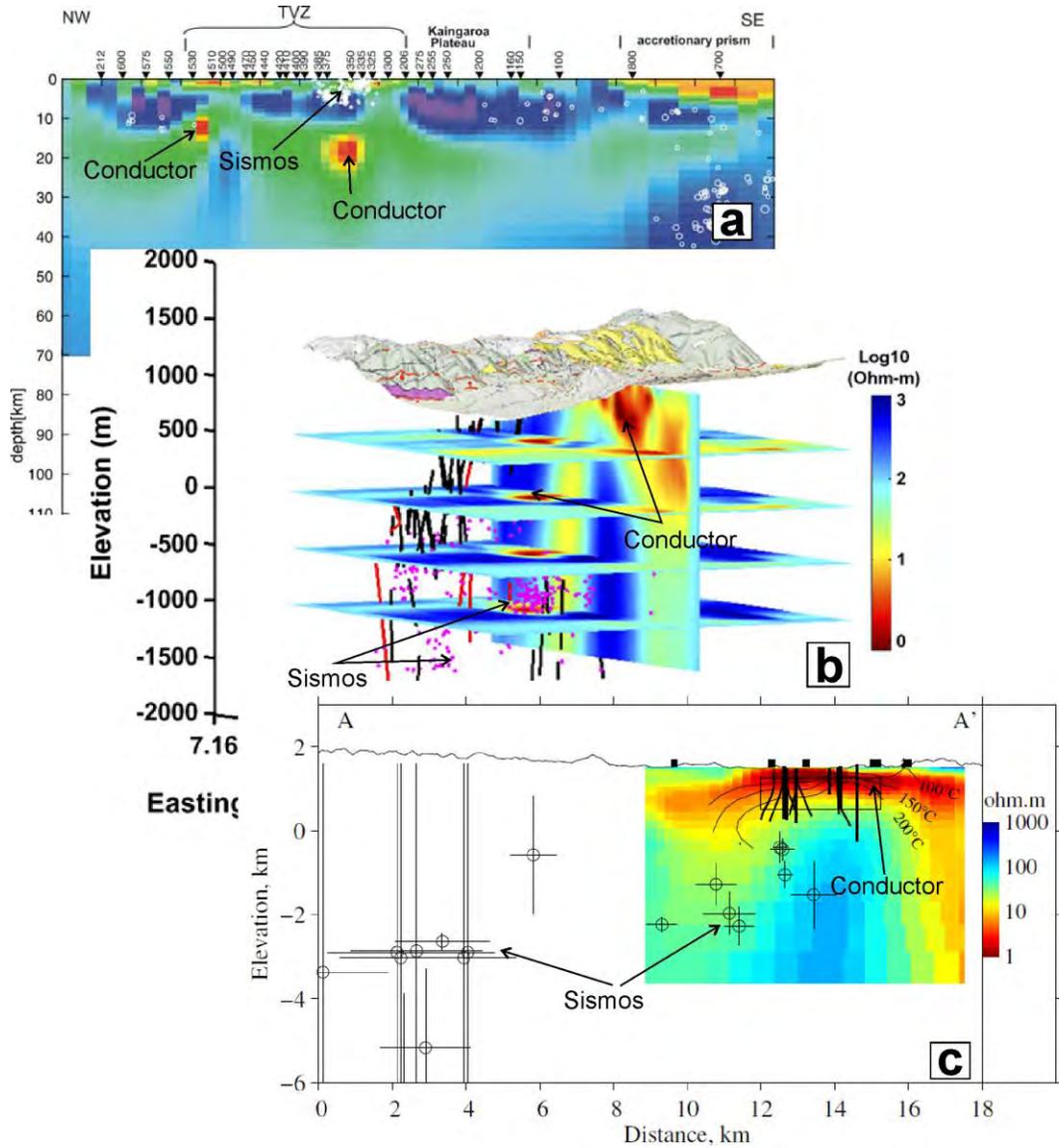
La zona superficial resistiva **R1** (30-80  $\Omega\text{m}$ ), está asociada a las rocas volcánicas (lavas basálticas, andesíticas, dacíticas y depósitos de flujos de escombros) de los volcanes La Virgen, El Azufre y El Viejo; la zona lateral conductiva **C1** ( $\leq 10$   $\Omega\text{m}$ ) está asociada a las rocas sedimentarias y volcánicas de las secuencias Santa Rosalía (SR), las formaciones Santa Lucía (SL) y Comondú (Co). Asimismo, esta zona conductiva presenta un alto grado de fracturamiento y alteración hidrotermal ([Hernández et al., 2010](#); [Macías et al., 2011](#); [Macías y Jiménez, 2012, 2013](#)) que se extienden hasta la parte más superficial, especialmente en las intersecciones de los volcanes La Virgen y El Azufre donde se observan pequeñas fumarolas y, en los sistemas de

fallas La Reforma-El Azufre y El Cimarrón (manifestaciones geotermales y alto grado de fracturamiento). En la zona resistiva **R2** (15-300  $\Omega\text{m}$ ), forma parte del basamento granodiorítico donde, además, se ubica el yacimiento geotérmico de Las Tres Vírgenes. Mientras tanto, las interfaces **R1-C1** y **C1-R2**, además de actuar como la capa sello, también delimitan las zonas de alteración de los minerales clorita, clorita-esmectita y epidota respectivamente.

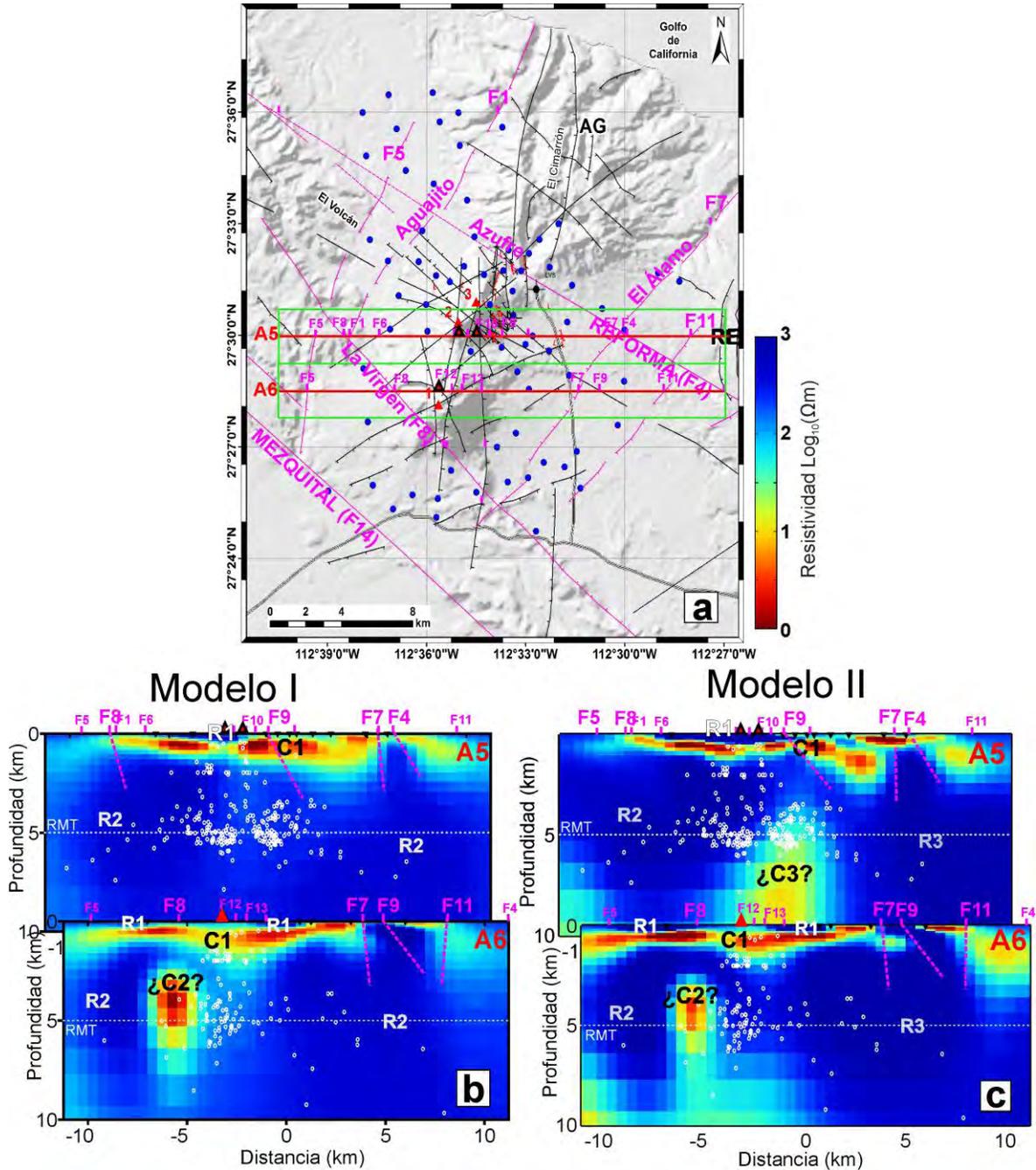
#### *5.5.5.3 Variación de la temperatura y la resistividad*

Aunque la información físico-química del CVGTV es parcialmente reservada (por ejemplo, presión, isothermas, etc.), la información disponible sugiere el incremento de la temperatura con la profundidad. Así por ejemplo, en la superficie, las temperaturas varían entre 70 y 100 °C. A profundidades variables entre 0.05 y 1.0-1.5 km, la temperatura alcanza hasta ~200 °C. Mientras tanto, a profundidades > 1.0 km, que corresponde a la interfase **R1-C1**, por la presencia del mineral clorita y su temperatura de formación (Newman et al., 2008; Árnason et al., 2010; Cumming y Mackie, 2010), se infiere una temperatura de ~240 °C. A profundidades entre 1.0 y 2.5 km (profundidad máxima alcanzada durante la perforación del pozo LV6) (Verma et al., 2006; Hernández et al., 2010), las temperaturas varían entre 90-100 °C y 250-290 °C (interfase **C1-R2**). Asimismo, por la presencia del mineral biotita a estos niveles de profundidad, se podrían alcanzar hasta temperaturas de ~320 °C. Por lo tanto, es posible inferir que en la zona de transición (ZT) delimitada en la zona central del CVGTV y a profundidades mayores a 6.5 km, alcancen temperaturas similares o próximas a los propuestos por Smith y Bruhn (1984) y Hill et al. (1993) (~350 °C).

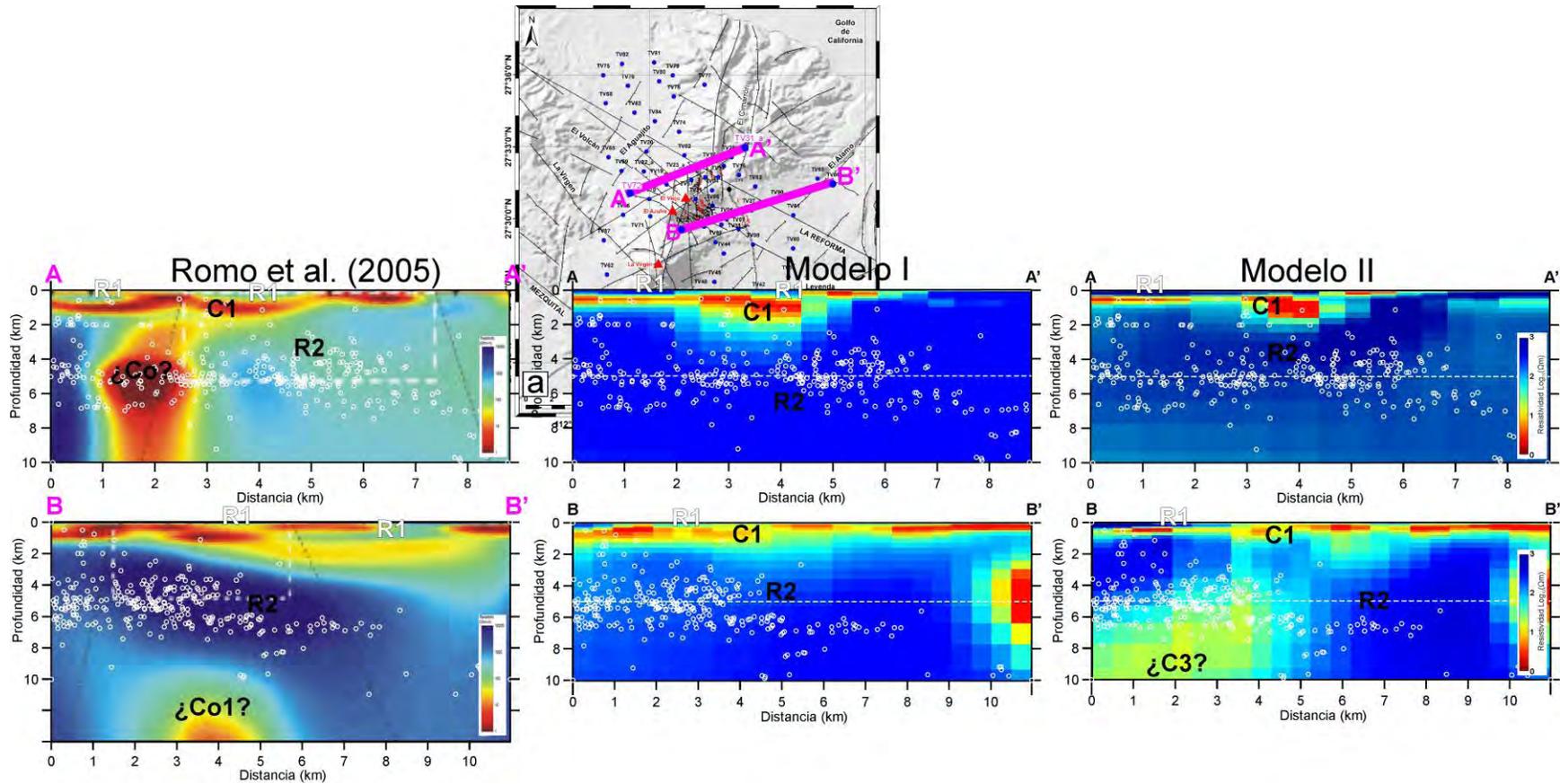
Con base en la integración y correlación de los resultados de los diferentes estudios sísmológicos, geológicos, geoquímicos y geofísicos y las correlaciones descritas por otros autores en otros campos volcánicos y geotérmicos (Heise et al., 2007; Newman et al., 2008; Baru-Raharjo; 2012), sugerirían que el Modelo II de la inversión magnetotelúrica 3D (Figura 5.20c) es el modelo que mejor caracteriza al Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV). Esta caracterización se presentará, con mayor detalle en el siguiente capítulo (Capítulo 6).



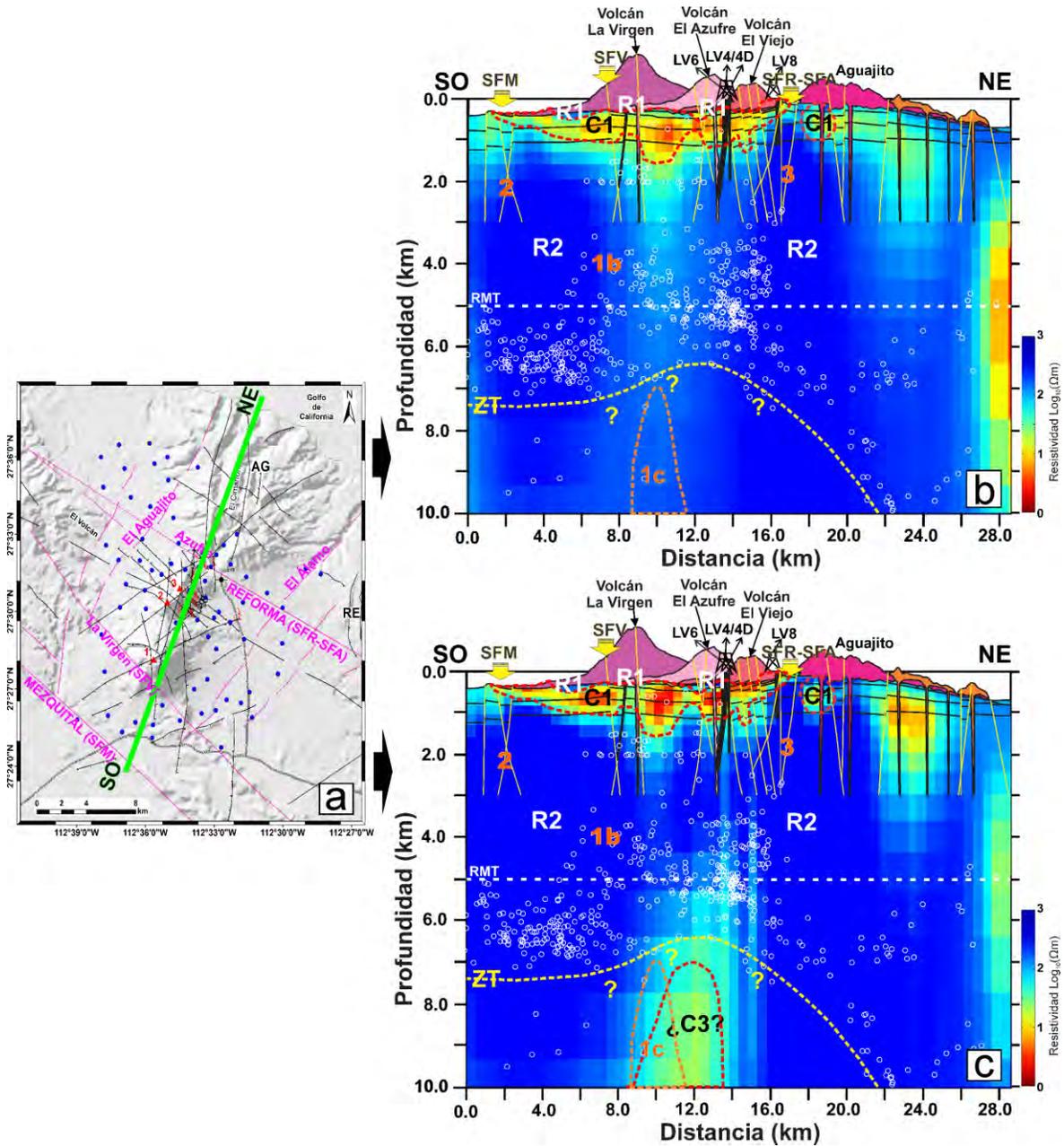
**Figura 5.19.** Distribución de la resistividad y la sismicidad en profundidad. Los perfiles corresponden a la zona volcánica de Taupo (TVZ) en Nueva Zelanda (Heise et al., 2007), b) al campo geotermal de Coso en Estados Unidos (Newman et al., 2008) y c) al sistema geotermal Kamojang en Indonesia (Baru-Raharjo, 2012).



**Figura 5.20.** Correlación de la distribución de la resistividad y la sismicidad del periodo 2003-2013 (círculos blancos). a) Mapa del CVGTV, ubicación de los sondeos MT y los perfiles en dirección O-E (A5, A6) b) Perfiles A5 y A6 utilizando el modelo de resistividad I y c) Perfiles A5 y A6 utilizando el modelo de resistividad II. Las líneas discontinuas en color magenta remarcan las discontinuidades de resistividad, probablemente asociadas a las fallas F4, F7, F8, F9 y F11 (ver [Tabla 5.2](#)). Las líneas discontinuas de color blanco representan a la profundidad máxima de buena resolución de la inversión magnetotelúrica 3D (RMT).



**Figura 5.21.** Distribución de la resistividad y la sismicidad en los perfiles b) A-A' y c) B-B', según las orientaciones SO-NE presentadas en el mapa tectónico (a). En el lado izquierdo se presenta los perfiles de resistividad de Romo et al. (2005), en el centro y lado izquierdo, los perfiles de resistividad elaborados con los Modelos I y II respectivamente. La línea discontinua en color blanco representa el límite de resolución (RTM) de la inversión 3D. R1 y R2 representan a las zonas resistivas y C1 a la zona conductiva superficial. ¿Co? es la anomalía conductiva identificada por Romo et al. (2005).



**Figura 5.22.** a) Mapa tectónico del CVGMTV y dirección SO-NE del perfil estratigráfico de Benton et al. (2011) donde se realizó la correlación de la distribución de la resistividad y la sismicidad correspondiente al periodo 2003-2013 (círculos blancos). b) Modelo I y c) Modelo II. Las líneas discontinuas en colores blanco y amarillo representan el límite de resolución del modelo de inversión 3D (RMT) y la delineación de la zona de transición (ZT) respectivamente. Los números y la línea discontinua en color anaranjado representan las ubicaciones de las anomalías de *valor b*, identificadas en la pseudo tomografía 3D (Figuras 3.33 y 3.34).

## 5.6 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO MAGNETOTELÚRICO

Del estudio magnetoelúrico del CVGTV, se resume lo siguiente:

- 1) Se recopilaron 79 sondeos magnetotelúricos registrados por [Vázquez et al. \(1992\)](#) y [Romo et al. \(1994\)](#) entre los años 1992 y 1994 y patrocinados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- 2) Del total de sondeos, se seleccionaron 70 sondeos MT y fueron clasificados en 4 tipos (A: 43, B: 17, C: 6 y D: 4), considerando similares características en la forma de las curvas de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) y fase ( $\Phi$ ).
- 3) se analizó la dimensionalidad de la estructura geoelectrica predominante en el CVGTV y la dirección del strike regional, utilizando para ello, los métodos de descomposición del tensor de [McNeice y Jones \(2001\)](#), el tensor de fase de [Caldwell et al. \(2004\)](#) y los vectores de inducción magnética utilizando la convención de [Wiese \(1962\)](#), los resultados mostraron estructuras 2D y 3D con strike regional orientado en dos direcciones preponderantes N45°E y N45°O.
- 4) Se realizó la inversión 3D de los 70 sondeos magnetotelúricos, utilizando el algoritmo WSINV3DMT desarrollado por [Siripunvaraporn et al. \(2005\)](#). Los resultados permitieron seleccionar 2 modelos de resistividad (I, II), con RMS de 2.12 y 1.63 respectivamente. En general, hasta profundidades menores a 5.0 km, ambos modelos MT mostraron resultados muy similares, donde el comportamiento de la resistividad sigue el modelo clásico observado en otros campos volcánicos y geotérmicos, tales como los campos geotermales de Puga en India ([Harinarayana et al. 2006](#)), Dixie y Coso en Estados Unidos ([Wannamaker et al., 2007](#); [Newman et al., 2008](#)), zona Volcánica de Taupo y Wairakei en Nueva Zelanda ([Heise et al., 2007](#); [Bibby et al. 2009](#)), entre otros.
- 5) La verificación de la resolución de la inversión 3D de los Modelo I y II, sugieren una buena resolución hasta profundidades de 5 km; por debajo de esta profundidad, la resolución es mínima o pobre debido a la baja calidad de los datos para periodos largos; por lo tanto, la selección de cualquiera de los modelos caracteriza muy bien la distribución de la resistividad del CVGTV.
- 6) Con base en los resultados de la correlación de los estudios sismológicos, geológicos, geoquímicos, hidrogeológicos previos, los estudios sismológicos y la respectiva distribución de la resistividad de ambos modelos (I y II) obtenidos en este estudio, permitieron considerar que el Modelo II ([Figura 5.22c](#)) es el modelo que mejor se correlaciona y caracteriza al CVGTV.

## CAPÍTULO 6

### DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CARACTERIZACIÓN SÍSMICA, AEROMAGNÉTICA Y MAGNETOTELÚRICA DEL CVGTV

#### 6.1 INTRODUCCIÓN

El Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), ubicada en la porción norte del estado de Baja California Sur, a 34 km al NO de la ciudad de Santa Rosalía (Figura 1.1a) y dentro de una depresión tectónica de acuerdo al análisis tridimensional regional de la profundidad al basamento magnético (Figura 4.8), inició su operación en 1982, desde entonces se han perforado 11 pozos entre productores (4), inyectores (3) y de exploración (4) (Hernández et al., 2010; Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo, 2013; Soto-Peredo, 2014). La explotación del recurso geotérmico proveniente de los 4 pozos productores (LV4A, LV6, LV11 y LV13D), operativos durante el periodo de este estudio (2003-2013), proveen de vapor geotérmico a dos plantas de generación, cada una de 5 MW. Junto con el proceso de explotación, también se llevan a cabo los procesos de inyección de agua al yacimiento geotérmico, con el propósito de mantener, relativamente estable, el sistema geotermal. Además de estos procesos propios de la explotación geotérmica, los estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos, e hidrogeológicos no cesan; por el contrario, durante los últimos 12 años, se han propuesto nuevas metodologías y técnicas, acorde al avance tecnológico a fin de descubrir nuevas zonas de explotación geotérmica y proveer de energía eléctrica, ambientalmente limpia y de bajo costo, a los habitantes del estado de Baja California Sur.

Así, en este estudio, y siguiendo la premisa de contribución a la investigación y desarrollo del CVGTV, se recopilaron los datos sismológicos correspondientes al periodo 2003-2013, registrados por la Red Sísmica Temporal (RST) y Permanente (RSP) del CVGTV e instaladas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto e Ingeniería de la UNAM. Con relación a los datos aeromagnéticos éstos fueron obtenidos del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2008); mientras que los datos magnetotelúricos, obtenidos por Vázquez et al. (1992), Romo et al. (1994), Romo y Wong (2000) y Romo et al. (2005) entre los años 1992 y 1994, fueron proporcionados por la CFE. Los resultados del procesamiento y análisis de estos datos son discutidos a continuación.

## 6.2 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis de 575 sismos registrados en el periodo 2003-2013, con magnitudes de coda ( $M_c$ ) menores a 3.2, profundidades menores a 6.5 km en la zona central del CVGTV (Zona A) y menores a 8 y 11 km en las zonas periféricas, evidenciaron que el CVGTV es altamente sísmica, tal como lo describieron Macías (1997), Rodríguez (2000), Wong et al. (2001); Wong y Munguía (2006) y Lermo et al. (2011) en los estudios sismológicos previos. Asimismo, se ha identificado que esta sismicidad ocurre en forma de enjambres (Figura 3.12). Estos enjambres analizados considerando, solamente, la definición general establecida en el glosario de términos publicados por el Programa de Riesgos Volcánicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2016), además de las observaciones de la forma de onda, rango de frecuencias y espectrogramas, permitieron identificar 13 enjambres en total. De éstos, 5 enjambres (1, 2, 3, 4 y 10), sustentados por su ubicación, así como las formas elipsoidales y elongadas (Mossop, 2001; Stark, 2003; Fisher y Horálek, 2005; Cuenot et al., 2008; Viegas y Hutchings, 2011) que adquirieron en la distribución espacial (Figura 3.12a) y en profundidad (Figura 3.12b), deben su origen a la perturbación del régimen de esfuerzos generados por las pruebas de inyección y operación del pozo LV6 y la inyección de agua al yacimiento geotérmico, a través del pozo LV8 (Figura 3.13) (Antayhua et al., 2015).

Generalmente, los enjambres crean nuevas fracturas o favorece un anticipado desplazamiento de fallas pre-existentes, mucho antes de lo que podría ocurrir naturalmente (Scholz, 1990). Este es el caso de los enjambres 1 y 10, puesto que el análisis del tensor de esfuerzo reveló que los desplazamientos ocurren en la dirección de una falla conjugada del sistemas de fallas El Volcán (enjambre 1) (Figuras 3.16a, 3.17) y los sistemas de fallas El Azufre-La Reforma (enjambre 10) (Figuras 3.16b y 3.18) (Antayhua et al., 2015).

Con relación a la influencia de la producción del vapor geotérmico, en este campo geotérmico, no se ha establecido alguna correlación clara, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Sminchak y Gupta, (2003), Baisch et al. (2006), Dorbath et al. (2009), Suckale (2009), Kwiątek et al. (2010) y Nicol et al. (2011), quienes mencionan que la sismicidad local está correlacionada, principalmente, con la inyección de fluidos más que con los procesos de producción. Estos mismos resultados, fueron observados en el Campo Geotérmico de Los Humeros (Antayhua, 2007; Lermo et al., 2008; Urban y Lermo, 2012). Mientras tanto, los 7 enjambres restantes (6, 7, 8, 9, 11, 12 y 13) estarían asociados a procesos tectónicos locales y regionales, tal como lo mostraron los resultados del tensor de esfuerzo (Figuras 3.16c, 3.17) (Antayhua et al., 2015).

El análisis detallado de estos enjambres, además, permitió establecer que los enjambres 6 y 7 fueron inducidos por los sismos de magnitud mayor ( $M=6.0$  y  $6.8$ ) del 12 de abril de 2012, localizados a 111 y 109 km al NO de Guerrero y  $\sim 170$  km al NO del CVGTV, similar a los descritos por Hill et al. (1993), Prejean et al. (2004), Gomberg et al. (2001) y Holtkamp et al. (2011). Estos autores, observaron que los sismos de magnitud mayor ( $M < 7$ ) tales como los

sismos de Landers (California) del 28 de junio de 1992, Denali (Alaska) del 3 de noviembre de 2002 y Hector Mine (California) en 1997, originaron enjambres sísmicos en las zonas volcánicas y geotérmicas de Cascadas, Monte Rainer, Long Valley y Coso, inclusive hasta distancias mayores a 1000 km. Otras características resaltantes de los enjambres 6, 7, 12 y 13 son los valores altos en sus parámetros de fuente (Figura 3.24) y valores  $b$  próximos a 1 ( $b \sim 1$ ) (Figura 3.35) que sustentan, claramente, el origen tectónico e inducido por un sismo de magnitud mayor ( $M = 6.0$  y  $6.8$ ).

En general, la distribución en profundidad de todos estos sismos (6.5 km, Zona A y entre 8 y 11 km en las zonas periféricas, Zonas B, C, D) son consistentes con los estudios sísmicos anteriores (Wong et al., 2001; Wong y Munguía, 2006; Lermo et al., 2011) y el cese o ausencia de los mismos, por debajo de los límites de profundidad antes mencionados, delinearían la zona de transición reológica frágil-dúctil (ZT) (Meissner y Strehlau, 1982; Chen y Molnar, 1983) del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV). Esta delineación de ZT, configuró una forma particular que se asemeja a un anticlinal cuyo máximo se localizó por debajo del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) del CVGTV.

Con relación al análisis del mapa aeromagnético de anomalías de campo total regional, muestran que los altos magnéticos están correlacionados con el subterreno Alisitos, las ofiolitas de Puerto Nuevo (Terreno Vizcaíno) y las anomalías de longitud de onda corta, con el Arco Comodú (Figura 4.1); mientras tanto, los mapas de derivadas (primera y segunda) (Figuras 4.3 y 4.4) y de gradientes con orientaciones  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $50^\circ$  y  $70^\circ$  (Figuras 4.5 y 4.6) muestran la posible continuación de los sistemas de fallas transformantes con dirección NO-SE provenientes del Golfo de California.

Aunque el análisis aeromagnético no ha permitido establecer una correlación clara con los estudios de carácter local del CVGTV, se ha podido evidenciar que este campo geotérmico se ubica dentro de una depresión tectónica (Figura 4.8), controlada por los principales sistemas de fallas Mezquital, La Virgen, La Reforma-El Azufre, El Aguajito y El Álamo. Precisamente, estos sistemas de fallas limitan la zona del campo volcánico y geotérmico, donde se llevan a cabo las operaciones de la explotación geotérmica. Estos resultados son consistentes con la distribución de las anomalías conductivas superficiales (C1) obtenidos del estudio magnetotelúrico (MT) a lo largo de los sistemas de fallas mencionados (Figura 5.9). También se ha establecido que los altos magnéticos identificados en este campo geotérmico, estarían asociados a diques o intrusiones en las calderas volcánicas El Aguajito (AG), La Reforma (RE) y el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) (Figura 4.9).

La complejidad geológica y tectónica del CVGTV observada con los estudios sismológicos y aeromagnéticos, también fueron evidenciados en el análisis de 70 sondeos magnetotelúricos obtenidos por Vázquez et al. (1992) y Romo et al. (1994) entre los años 1992 y 1994 respectivamente. Así por ejemplo, la evaluación del *strike* regional mostraron 2 orientaciones ( $N45^\circ O$ ,  $N45^\circ E$ ) (Figura 5.3d) que dificultaron establecer cuál de ellos

representaría las orientaciones preferenciales del *strike* regional del CVGTV, y que sea correlacionable con los sistemas de fallas representativas del campo geotérmico. Asimismo, la evaluación de la dimensionalidad (Figuras 5.4 y 5.5) representaron, claramente, una estructura geoelectrica 2D y 3D; motivo por el cual se realizó la inversión tridimensional (3D) de 70 sondeos magnetotelúricos del CVGTV. Los resultados permitieron seleccionar 2 modelos de inversión 3D con valores de RMS de 2.12 (Modelo I) y 1.62 (Modelo II); ambos modelos presentan buenas resoluciones (RMT) hasta ~ 5 km de profundidad; mientras que por debajo de ésta, la resolución es mínima o pobre. Así, con base a la integración de los resultados de los diferentes estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos realizados previamente y los obtenidos en este estudio, se consideró que el Modelo II (RMS = 1.62) de la inversión magnetotelúrica 3D (Figura 5.22b) es el modelo que mejor caracteriza al Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV); en este contexto, la Figura 6.1 muestra la caracterización e interpretación de los resultados.

### 6.3 CARACTERIZACIÓN SÍSMICA, AEROMAGNÉTICA Y MAGNETOTELÚRICA DEL CAMPO VOLCÁNICO Y GEOTÉRMICO DE LAS TRES VÍRGENES (CVGTV)

La caracterización geofísica y el resumen de la misma, presentadas en la Figura 6.1 y la Tabla 6.1, muestran la integración de la sismicidad correspondiente al periodo 2003-2013, la tectónica, la geología, la estratigrafía, la geoquímica (Verma et al., 2006; Hernández et al., 2010; Benton et al., 2011; Macías et al., Macías y Jiménez, 2012, 2013) y la distribución de la resistividad obtenida en este estudio.

Los resultados muestran que el CVGTV, similar a otros campos volcánicos y geotérmicos (Harinarayana et al., 2006; Heise et al., 2007; Wannamaker et al., 2007; Newman et al., 2008; Bibby et al. 2009), presenta un modelo clásico compuesto por 5 zonas: 2 zonas resistivas (**R1**, **R2**) y 3 zonas conductivas (**C1**, **¿C2?** y **¿C3?**). De estas 5 zonas, **R1**, **R2** y **C1** se encuentran plenamente identificadas y correlacionadas; mientras tanto, **¿C2?** y **¿C3?**, cuyos signos de interrogación hacen referencia a su ubicación cercana y por debajo del límite de profundidad máxima de resolución de la inversión magnetotelúrica 3D (RMT) (~5 km), así como al reducido número de sondeos MT con los cuales fueron realizadas las inversiones, no permitieron establecer correlaciones claras; por lo tanto, la interpretación de sus posibles orígenes, están soportadas, básicamente, por los resultados de los estudios sismológicos de este estudio y otros estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos previos. Por lo tanto, el CVGTV está conformado por:

- 1) La primera zona superficial de alta resistividad **R1** (30-80  $\Omega$ m), está asociada a las rocas volcánicas (lavas basálticas, andesíticas, dacíticas y depósitos de flujos de escombros) de los volcanes la Virgen, El Azufre y El Viejo.
- 2) La segunda zona conductiva **C1** ( $\leq 10$   $\Omega$ m) se presenta, lateralmente, por debajo de la zona **R1**. Como se mencionó anteriormente, esta zona anómala fue observada en

la mayoría de campos volcánicos y geotérmicos, y está correlacionada con las rocas sedimentarias y volcánicas de las secuencias Santa Rosalía (SR), las formaciones Santa Lucía (SL) y Comondú (Co). En esta zona, las temperaturas son altas (70-200 °C) y presentan alto grado de fracturamiento y alteración hidrotermal (Hernández et al., 2010; Macías et al., 2011; Macías y Jiménez, 2012, 2013) que se extienden hasta la parte más superficial, especialmente en las intersecciones de los volcanes La Virgen y El Azufre (presencia de pequeñas fumarolas), y en los sistemas de fallas La Reforma-El Azufre y El Cimarrón (manifestaciones geotermales y alto grado de fracturamiento). Estas características explicarían la ausencia de sismicidad en esta zona.

- 3) Por debajo de esta zona conductiva **C1**, se ubica la zona resistiva **R2** (15-300  $\Omega$ m), a profundidades mayores a 1 km, y forma parte del basamento granodiorítico caracterizado por presentar temperaturas variables ente 90-100°C y 250 °C. En esta zona se ubica el yacimiento geotérmico de Las Tres Vírgenes; la profundidad del mismo, aún no está establecido debido a que la máxima profundidad alcanzada durante la perforación del pozo LV6, fue de 2.5 km donde se estimó una temperatura de ~290 °C (Hernández et al., 2010). Por la distribución de los sismos y debido a que éstos solamente pueden ocurrir en ambientes frágiles, se infiere que el basamento podría prolongarse hasta ~6.5 km por debajo del CVGTV y a mayor profundidad (8 a 11 km) en los extremos del mismo. En efecto, el cese o ausencia de sismicidad por debajo de estos límites de profundidad sismogénica, delinearía la zona de transición (ZT). La particularidad de ZT es la forma de anticlinal que adquiere en la zona central del CVGTV y por debajo del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (La Virgen, El Azufre y El Viejo).
- 4) En la misma zona resistiva **R2**, se identificó la cuarta zona conductiva anómala **¿C2?** (ubicada al NO del cráter del volcán La Virgen, a profundidades de 2.5 a 5.5 km aprox.), con un área aproximada de 6 km<sup>2</sup>. Aunque la presencia de esta anomalía es cuestionable, debido al reducido número de sondeos MT con los cuales fue realizado la inversión magnetotelúrica 3D, la ausencia de sismicidad a estos niveles de profundidad (Figuras 5.20b y 5.20c), el análisis de atenuación de las ondas de coda de este estudio (Figuras 3.22, 3.23), los obtenidos por Ramos-Pérez y Lermo-Samaniego (2015) y la tomografía pseudo 3D del *valor b* de este estudio (Figuras 3.33b y 3.34), parecen confirmarlo.
- 5) Mientras tanto, por debajo de esta zona de transición (ZT) y por debajo del CVTV, que representaría, también, la interfase entre la zona resistiva **R2** y **¿C3?** y la isoterma de ~350°C (considerando las hipótesis de Smith y Bruhn, 1984 y Hill et al., 1993), se ubicaría la posible quinta zona anómala conductiva (**¿C3?**) ( $\leq 15 \Omega$ m) cuyo aspecto de *intrusión* coincide con la forma particular de ZT (anticlinal). Si bien la zona lateral conductiva **C1**, se explica por la presencia de capas de rocas

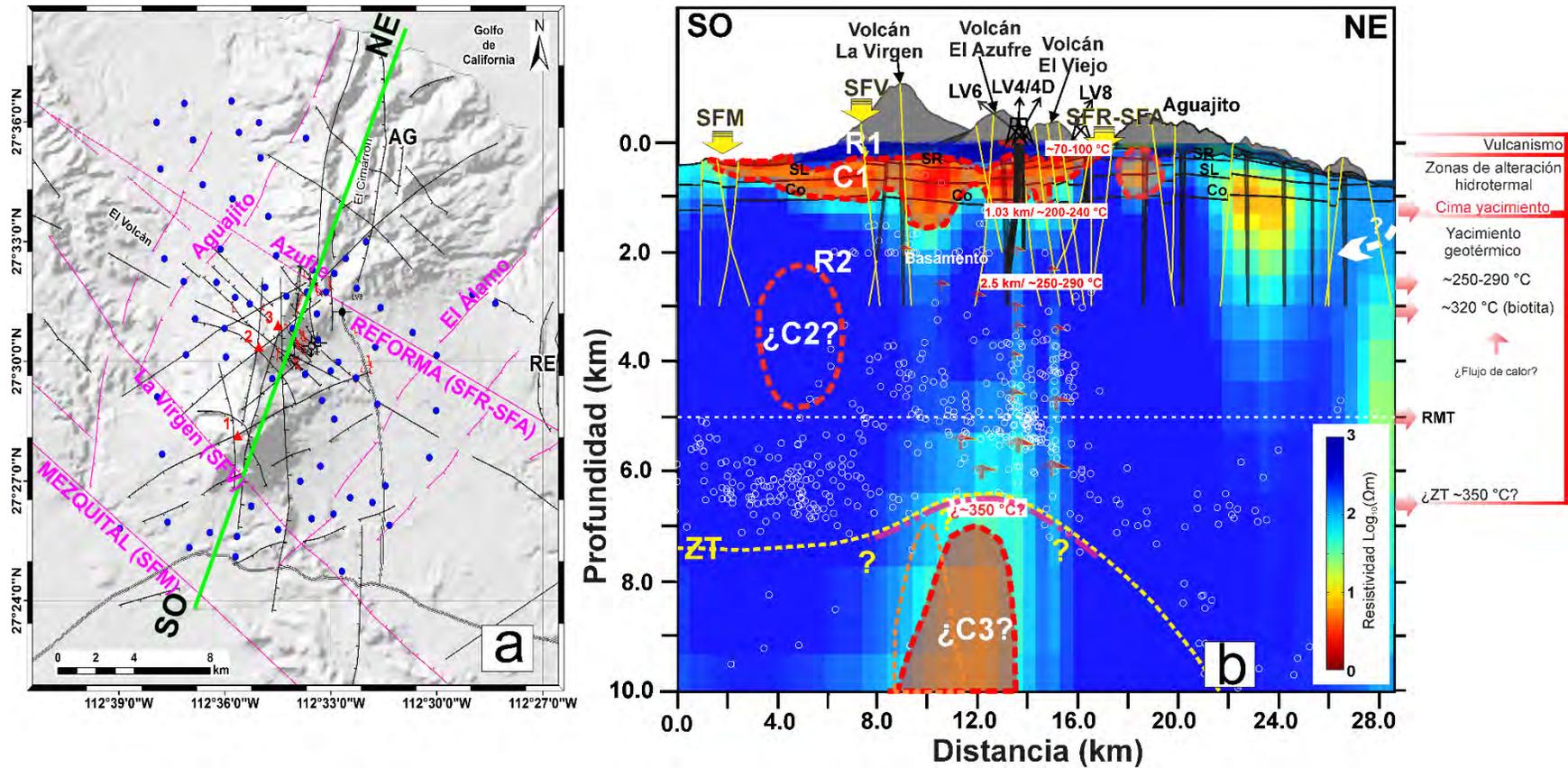
sedimentarias y volcánicas con alto grado de fracturamiento, alteración hidrotermal y temperaturas altas, la posible presencia de ¿C3? aún es tema de discusión en este estudio, especialmente, por la baja resolución de la inversión MT (3D) por debajo de los 5 km de profundidad. Sin embargo, el cese de la sismicidad es innegable y la forma de ZT soportarían la posible presencia del cuerpo conductivo que podrían estar asociados a la *intrusión* de un cuerpo parcialmente fundido o un dique caliente (¿fuente de calor?). Según Heise et al. (2007), basta con una porción de material fundido para que la resistividad disminuya considerablemente; además, la ausencia de sismicidad es evidente debido a que los sismos solamente pueden ocurrir cuando las rocas se comportan de manera frágil. Por otro lado, el análisis del origen de los magmas que originaron el CVTV, obtenidos por Macías et al. (2011) y Macías y Jiménez (2012, 2013), soportarían esta hipótesis, pues establecieron que se generaron a profundidades entre 7 y 9 km, lo cual es concordante con la ubicación en profundidad de la posible anomalía conductiva ¿C3?.

Asimismo, los estudios magnetoteléuricos previos de Romo et al. (2005) (Figuras 1.2, 5.13b y 5.14b) sugieren la presencia de una zona anómala de baja resistividad entre los 5 km (¿Co?) y 12 km (¿Co1?), que podría estar asociadas a la fuente de calor y/o fluidos salinos. Con relación a los fluidos salinos, como fuente de la anomalía conductiva ¿C3?, podría ser explicado con base al modelo químico del CVGTV elaborado por Verma et al. (2006), donde sugieren que, además de la existencia de aguas fósiles (paleofluidos) en profundidad (Portugal et al., 2000), también habría recarga del agua de mar procedente del Golfo de California. Esta recarga ocurriría a través de los sistemas de fallas del Golfo de California, en particular, de la Cuenca de Guaymas (Morandi et al., 2002). Por otro lado, la integración de estudios geofísicos previos por Gómez et al. (2010) y Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013), indicaron que la fuente de calor del CVGTV se trataría de una cámara magmática ubicada por debajo de los 5 y 6 km y con extensiones variables entre 6 (Figura 1.4) y 14 km (Figura 1.6) aproximadamente.

Si en efecto, se tratara de la *intrusión* de un cuerpo parcialmente fundido o de un dique caliente, éste actuaría como la fuente de calor del CVGTV. Tal como sugerirían los resultados del modelo bidimensional de los cuerpos magnéticos presentados en la Figura 4.9, los flujos de calor provenientes de esta *intrusión*, serían transportados a través de los diferentes sistemas de fallas regionales y locales hasta el reservorio geotérmico y la superficie; en este último, se manifiestan como fuentes termales y fumarolas, en la intersección de los sistemas de fallas La Reforma-El Azufre (SFR-SFA) y entre los volcanes La Virgen y El Azufre (Hernández et al., 2010; Macías et al., 2011; Macías y Jiménez, 2012, 2013).

Por la forma y extensión de esta posible *intrusión* (~4 km), se deduce que es una fuente de calor pequeña, comparada a los propuestos por Gómez et al. (2010)

(Figura 1.4) y Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013) (Figura 1.6) y en otros campos volcánicos y geotérmicos. Sin embargo, para obtener una mayor precisión y/o corroborar, primero, la existencia de esta zona conductiva anómala ¿C3?, así como la ubicada al NO del cráter del volcán de Las Tres Vírgenes (¿C2?) y segundo, la forma y extensión de la mismas, se recomienda realizar un mayor número de sondeos magnetoteléuticos que cubran el área de ambas anomalías y considerar un mayor tiempo de registro, a fin de alcanzar profundidades de exploración mayor a los obtenidos en este estudio.



**Figura 6.1.** a) Mapa tectónico del CVGV donde se muestra la dirección SO-NE del perfil estratigráfico de Benton et al. (2011). b) Integración de los estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos en el perfil estratigráfico de Benton et al. (2011). R1 y R2 representan a las zonas resistivas; C1, ¿C2? y ¿C3?, representan a las zonas conductivas; los círculos blancos son los hipocentros de los sismos (periodo 2003-2013); la línea discontinua en color amarillo delinea la posible zona de transición frágil-dúctil (ZT); La flecha blanca representa el posible ingreso de agua de mar (Verma et al., 2006) a través de los sistemas de fallas del Golfo de California, en particular, de la Cuenca de Guaymas (Morandi et al., 2002); las flechas en color rojo indica el posible camino del flujo de calor que alimentaría al campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.

**Tabla 6.1.** Resumen de la caracterización del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) correlacionando los estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos previos y los obtenidos en este estudio. Prof.= profundidad en kilómetros;  $\Omega\text{m}$  (Ohm-metro). R1 y R2 representan a las zonas resistivas; C1, ¿C2? y ¿C3? representan a las zonas conductivas anómalas. Los signos de interrogación hacen referencia a la incertidumbre de la presencia o no de dichas zonas conductivas.

Resistividad		Temperatura (°C)	Sismicidad	Prof. (km)	Correlación con estudios previos y este estudio
Zonas	( $\Omega\text{m}$ )				
<b>R1</b>	30-80 $\Omega\text{m}$	~70	Ausencia	<0.1	Rocas volcánicas (lavas basálticas, andesíticas, dacíticas y depósitos de flujos de escombros) de los volcanes la Virgen, El Azufre y El Viejo (Benton et al., 2011; Macias et al., 2012, 2013).
Interfase R1-C1		~200°C		~0.05-0.1	Interfase
<b>C1</b>	$\leq 10 \Omega\text{m}$	70-100°C y 200°C		0.05-1.5	Anomalía conductiva asociada a rocas sedimentarias y volcánicas de las secuencias Santa Rosalia (SR), las formaciones Santa Lucía (SL) y Comondú (Co). Estas rocas presentan un alto grado de fracturamiento y alteración hidrotermal, con temperaturas que fluctúan entre 70-100 °C y 200 °C (Verma et al., 2006; Hernández et al., 2010).
Interfase C1-R2		~240°C	Incremento importante	~0.5-1.5	Interfase: clorita (T° ~240 °C) (Newman et al., 2008; Árnason et al., 2010; Cumming y Mackie, 2010).
<b>R2</b>	15-300	250-290°C ~320 °C	Altamente sísmica	~1.1-6.5	Epídota (T° ~250 °C) Reservorio geotérmico Basamento: granodiorita de biotita (T°>320 °C)
	¿C2?	$\leq 10 \Omega\text{m}$	Ausencia	2.5-5.5	Extensión ~4 km Anomalía de baja resistividad NO del cráter del volcán La Virgen
Interfase R2-¿C3?		~350°C	Reducida	6.5; 8-11	Zona de transición (ZT) Isoterma: ~350 °C
¿C3?	$\leq 15 \Omega\text{m}$		Ausencia	>6.5	Anomalía conductiva que podría estar asociada a la posible intrusión de un cuerpo parcialmente fundido o un dique caliente (¿fuente de calor?).

## CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 7.1 CONCLUSIONES

De los estudios sismológicos, aeromagnéticos, magnetotelúricos y la caracterización geofísica del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), se obtuvieron las siguientes conclusiones:

## 7.1.1 Del estudio sismológico (periodo 2003-2013)

1. Se localizaron 575 sismos, con magnitudes de coda ( $M_c$ ) menores a 3.2, profundidades menores a 6.5 km en la zona central del CVGTV (Zona A) y menores a 8 y 11 km en las zonas periféricas (Zonas B, C y D). Se identificaron 13 enjambres sísmicos y se establecieron que cinco de ellos (1, 2, 3, 4 y 10) fueron inducidos por perturbación del régimen de esfuerzos generados por las pruebas de inyección y operación del pozo LV6 y la inyección de agua al yacimiento geotérmico, a través del pozo LV8. Los 7 restantes (6, 7, 8, 9, 11, 12 y 13) estarían asociados a procesos tectónicos locales y regionales. De éstos, solamente los enjambres 6 y 7, fueron inducidos por los sismos de magnitud mayor ( $M=6.0$  y  $6.8$ ) del 12 de abril de 2012, localizados a 111 y 109 km al NO de Guerrero Negro (B.C.S.) y  $\sim 170$  km al NO del CVGTV.
2. El análisis del tensor de esfuerzo elaborado para los enjambres 1 y 10, así como para los sismos ubicados a lo largo de los sistemas de fallas Bonfil-Mezquitil, La Virgen, La Reforma-El Azufre y El Cimarrón, revelaron que los desplazamientos ocurren en la dirección de las fallas pre-existentes El Volcán (enjambre 1) y los sistemas de fallas El Azufre-La Reforma (enjambre 10). Asimismo, mostraron que el campo de esfuerzo preponderante del CVGTV, es de tipo extensivo.
3. Con el análisis de la atenuación sísmica de ondas de coda ( $Qc^{-1}$ ) o factor de calidad  $Qc$ , elaborado para las frecuencias centradas en 2, 4, 8 y 16 Hz, se pudo evidenciar, en general, una alta atenuación sísmica; así, la ley de atenuación  $Qc$  promedio a la frecuencia de 1 Hz ( $Qc = 29.57 \pm 04f^{0.75 \pm 0.03}$ ), presenta valores bajos ( $Q_0=29.57$ ), comparables a otros campos volcánicos y geotérmicos, con características geológicas y tectónicas heterogéneas. Por otro lado, la regionalización de  $Qc$ , evidenció una alta atenuación al NO del cráter del volcán La Virgen.

4. El análisis de los parámetros de fuente de 321 sismos registrados en el CVGTV, mostró, en general, valores bajos; sin embargo, los valores relativamente altos están asociados a los enjambres tectónicos inducidos (6, 7) y tectónicos (11, 12 y 13). Por otro lado, se evidenció que el patrón de la caída de esfuerzo no es constante, debido probablemente, a los efectos de circulación de fluidos, gases, altas temperaturas, típicos en campos volcánicos y geotérmicos
5. El análisis del *valor b* y la tomografía pseudo 3D, permitió identificar valores altos o anómalos ( $b > 1.4$ ) y bajos o normales ( $b \sim 1$ ); el primero, estaría asociado a la alta heterogeneidad geológica y tectónica, enjambres sísmicos, circulación de fluidos y/o flujos de calor, intrusiones o diques; mientras que el segundo, al proceso tectónico local y regional. Ejemplos de ambos fueron observados al NO del cráter del volcán La Virgen y por debajo del CVTV, a profundidades mayores a 6.5 km, donde el *valor b* alto o anómalo fue mayor a 1.5 ( $b > 1.5$ ); mientras que para los enjambres 6 y 7, los *valores b* fueron próximos a 1 ( $b \sim 1$ ), corroborando así, su origen tectónico e inducido por un sismo de magnitud mayor ( $M = 6.0$  y  $6.8$ ).

### 7.1.2 Del estudio aeromagnético

6. A nivel regional, el análisis del mapa aeromagnético de campo total, muestra que los altos magnéticos están correlacionados con el subterreno Alisitos y las ofiolitas de Puerto Nuevo (Península Vizcaíno); mientras que las anomalías de longitud de onda corta con el Arco Comondú. Asimismo, el análisis de los mapas de derivadas y gradientes con orientaciones  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $50^\circ$  y  $70^\circ$  muestran la posible continuación de los sistemas de fallas transformantes con dirección NO-SE provenientes del Golfo de California. Asimismo, la profundidad a la isoterma de Curie fue estimada entre 18.92 y 23.32 km, que coinciden con la profundidad de la corteza en Baja California Sur estimados por [Persaud et al. \(2007\)](#) (20.9-23.7 km) y [Fernández \(2014\)](#) ( $\sim 25$  km) mediante los estudios sísmicos de funciones receptoras. Estos resultados sugerirían que a estos niveles de profundidad ( $\sim 8$  y 25 km) la base de la corteza se encontraría a temperaturas relativamente elevadas.
7. A nivel local: se evidenció que este campo geotérmico se ubica dentro de una depresión tectónica, controlada por los principales sistemas de fallas Mezquital, La Virgen, La Reforma-El Azufre, El Aguajito y El Álamo. Precisamente, estos sistemas de fallas (La Virgen, La Reforma-El Azufre, El Aguajito y El Álamo) limitan la zona del campo volcánico y geotérmico, donde se llevan a cabo las operaciones de la explotación geotérmica. Asimismo, el modelado bidimensional de los cuerpos magnéticos, sugieren cuerpos tabulares, probablemente asociados a intrusiones de diques o fallas por donde circularían los fluidos que alimentan el CVGTV

8. Los resultados del estudio aeromagnético, en conjunto, mostraría que la tectónica controla el vulcanismo, la geotermia y actividad sísmica en el CVGTV y en las calderas de La Reforma y El Aguajito.

### 7.1.3 Del estudio magnetotelúrico

9. Se recopilaron 79 sondeos magnetotelúricos registrados por [Vázquez et al. \(1992\)](#) y [Romo et al. \(1994\)](#) entre los años 1994 y 1999 y patrocinados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Del total de sondeos, se seleccionaron 70 sondeos MT; se analizó la dimensionalidad de la estructura geoelectrica predominante en el CVGTV y la dirección del strike regional, utilizando para ello, los métodos de descomposición del tensor de [McNeice & Jones \(2001\)](#), el tensor de fase de [Caldwell et al. \(2004\)](#) y los vectores de inducción magnética utilizando la convención de [Wiese \(1962\)](#), los resultados mostraron estructuras geoelectricas 2D y 3D, con dos direcciones de strike regional orientados N45°E y N45°O respectivamente.
10. Se realizó la inversión 3D de los 70 sondeos magnetotelúricos, utilizando el algoritmo WSINV3DMT ([Siripunvaraporn et al., 2005](#)) y se obtuvieron 2 modelos de resistividad (I, II), con comportamientos similares en la distribución de la resistividad hasta profundidades de 5 km. Esta distribución, a niveles superficiales están estrechamente correlacionadas con la geología, la estratigrafía y la tectónica del CVGTV. Asimismo, el comportamiento de la resistividad, en profundidad, sigue el modelo clásico observado en otros campos volcánicos y geotérmicos, donde resalta la zona lateral conductiva **C1**, ubicada entre las zonas resistivas **R1** (superficial) y **R2** respectivamente.
11. Sin embargo, por debajo de la profundidad de 5 km, la distribución de la resistividad del Modelo I varió considerablemente con respecto al Modelo II, debido a que en el primero no aparece la zona conductiva **¿C3?** que sí se muestra identifica en el segundo. Por la ambigüedad mostrada en ambos modelos, se analizaron las resoluciones de las inversiones, estos análisis demostraron que la buena resolución, solamente puede ser garantizada hasta la profundidad máxima de 5 km; mientras que por debajo de la misma, la incertidumbre es mayor.
12. Con base en los resultados de los diferentes estudios sismológicos efectuados en este estudio y la recopilación de estudios previos (sismológicos, geológicos, geoquímicos e hidrogeológicos), se consideró el Modelo II, como el modelo que mejor caracteriza al CVGTV.

### 7.1.4 De la caracterización geofísica del CVGTV

13. La caracterización efectuada en el Modelo II, muestra que el subsuelo del CVGTV está conformada por 2 zonas resistivas (**R1**, **R2**) y 3 zonas conductivas (**C1**, **¿C2?**, **¿C3?**). Las

tres primeras zonas (**R1**, **C1**, **R2**) están estrechamente correlacionadas con la tectónica, geología y estratigrafía del CVGTV. Asimismo, la presencia de la segunda capa lateral conductiva **C1**, muestra que este campo, similar a otros, presenta el modelo clásico de un campo geotermal. Esta zona conductiva anómala estaría correlacionada con las rocas sedimentarias y volcánicas de las secuencias Santa Rosalía (SR), las formaciones Santa Lucía (SL) y Comodú (Co), con altas temperaturas (70-200°C), alto grado de fracturamiento y alteración hidrotermal. La zona resistiva **R2**, donde se ubica el reservorio geotérmico, se constituye como el basamento del CVGTV y está conformada de granodiorita de biotita. Esta zona, a su vez, se caracteriza por presentar alta actividad sísmica asociada a los procesos de acidificación, limpieza de pozos y los procesos tectónicos regionales y locales. La profundidad máxima a la que ocurren estos sismos delinearían la zona de transición reológica frágil-dúctil (ZT) del campo geotérmico.

14. La particularidad de ZT que representaría, también, los límites del basamento, así como el límite de la zona resistiva **R2** y la isoterma de ~350°C, es la forma que presenta (forma de un anticlinal), que al correlacionarlo con los resultados de la tomografía pseudo 3D del *valor b* (Figura 3.39) y la forma de la anomalía conductiva ¿C3?, ubicada por debajo de ZT, apoyaría la posible presencia de una *intrusión* de un cuerpo parcialmente fundido o un dique caliente de ~4 km de extensión; esta *intrusión* actuaría como la fuente de calor del CVGTV. Los flujos de calor provenientes de esta *intrusión* serían transportados a través de los diferentes sistemas de fallas regionales y locales hasta la superficie, tal como sugerirían los resultados del modelo bidimensional de los cuerpos magnéticos presentados en la Figura 4.9.
15. Por otro lado, en la zona resistiva **R2**, se ha identificado una anomalía conductiva ¿C2? (ubicada al NO del cráter del volcán La Virgen, a profundidades de 2.5 a 5.5 km aprox.), con un área aproximada de 6 km<sup>2</sup>. Aunque la existencia de esta anomalía es cuestionable debido al reducido número de sondeos MT con los cuales fue realizado la inversión MT (3D), la ausencia de sismicidad a estos niveles de profundidad, el análisis de atenuación de las ondas de coda, parecen confirmar estos resultados.
16. Finalmente, los resultados de los estudios sismológicos, aeromagnéticos y magnetotélúricos muestran que la tectónica controlaría el vulcanismo y la geotermia en el CVGTV.

## 7.2 RECOMENDACIONES

Considerando el problema de la baja resolución de la inversión 3D de los datos magnetotélúricos, por debajo de los 5 km, los cuales generaron incertidumbre en la interpretación de las zonas conductivas anómalas ¿C2? Y ¿C3?, ésta última correlacionada en este estudio con una posible *intrusión* de un cuerpo parcialmente fundido o un dique caliente, se recomienda:

1. Realizar un mayor número de sondeos magnetotelúricos que cubran el área de la anomalía conductiva **¿C3?** y considerar un mayor tiempo de registro a fin de mejorar la resolución en profundidad; asimismo, permitirá corroborar o descartar la ubicación, forma y extensión de la posible fuente de calor del CVGTV.
2. Realizar estudios, geológicos, geoquímicos, hidrogeológicos y geofísicos, con mayor detalle, en los alrededores de la anomalía conductiva **¿C2?**, a fin de analizar si sería propicia para considerarla como una nueva zona de exploración geotérmica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abercrombie, R. y Leary, P., 1993. Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5 km depth, Cajon Pass, southern California: Implications for earthquake scaling. *Geophys. Res. Lett.*, 20: 1511-1514.
- 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.
- Aki, K., 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 43: 237-239.
- Aki, K., 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Jour. Geophys. Res.*, 74: 615-631.
- Aki, K. y Chouet, B., 1975. Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects. *Jour. Geophys. Res.*, 80: 3322-3342.
- Aki, K. 1980a. Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 21: 50-60.
- Aki, K., 1980b. Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere. *Jour. Geophys. Res.*, 85, 6496-6504.
- Allmann, B.P. y Shearer P.M., 2009. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *Jour. Geophys. Res.*, 114, B01310, doi:10.1029/2008JB005821.
- Anderson, J.G., 1997. Seismic energy and stress-drop parameters for a composite source model. *Seismol. Soc. Am.*, 87: 85-96.
- Angelier, J. y Mechler, P., 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 7 (19): 1309-1318.
- Antayhua, Y., 2007. Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros-Puebla (1997-2004), su relación con los pozos y la tectónica local. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría. 136 p.
- Antayhua, Y., Lermo, J. y Vargas, C., 2008. Estudio sísmológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte II: tomografía sísmica por atenuación a partir de ondas de coda (Qc-1) de sismos locales. *Geotermia*, Revista Mexicana de Geoenergía, 21(2): 29-42.
- Antayhua-Vera, Y., Lermo-Samaniego, J., Quintanar-Robles, L. y Campos-Enríquez, O., 2015. Seismic activity and stress tensor inversion at Las Tres Vírgenes Volcanic and Geothermal Field (México). *Jour. Vol. Geother. Res.*, 305: 19-29. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.08.005.
- Antayhua, Y. y Ramos, D., 2012. Estimación de Coda Qc en el volcán Huaynaputina (2010). XVI Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. SGPSEG049.

- Arango-Galván, C., Prol-Ledesma, R.S. y Torres-Vera, M.A., 2009. Geothermal prospects in the Baja California Peninsula. *Geothermics*, 55: 39–57, doi:10.1016/j.geothermics.2015.01.005.
- Árnason, K., Eysteinnsson, H y Hersir J.P., 2000. Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland. *Geothermics*, 39: 13–34.
- Árnason, K., Eysteinnsson, H. y Hersir, G.P., 2010. Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland. *Geothermics*, 39: 13–34.
- Atwater, T., 1970. Implications of Plate Tectonics for the Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81: 3513-3536.
- Asociación Geotérmica Mexicana, AGM, 2016. <http://www.geotermia.org.mx/geotermia>.
- Atwater, T. y Stock, J., 1998. Pacific-North America plate tectonics of the Neogene Southwestern Unites States. An Update, *Int. Geology Rev.*, 40: 375-402.
- Auerbach S.T. y Bleil, U., 1987. Magnetic Struture of a Former Hydrothermal System in the Troods Ophiolite (Cyprus). In: Robinson, P.T.; Gibson, I.L.; Panayiotou, A. ed. Cyprus Crustal Study Project: Initial Report, Holes CY-2 and 2a. Ottawa: Energy, Mines and Resources Canada. Geological Survey of Canada paper 85-89.
- Bachmann, C., Wiemer, S., Goertz-Allmann, B. y Woessner, J., 2012. Influence of pore pressure on the size distribution of induced earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (9) <http://dx.doi.org/10.1029/2012GL051480>.
- Bahr, K., 1991. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 66: 24-38.
- Baisch, S., Weidler, R., Vörös, R., Wyborn, D. y DeGraaf, L., 2006. Induced seismicity during stimulation of a geothermal HFR reservoir in the Cooper Basin (Australia). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96: 2242–2256.
- Ballina, H., 1985. Estudio geofísico en la zona geotérmica de Tres Vírgenes, B.C.S., *Geotermia*, Revista Mexicana de Geoenergía ,1(1): 21-43.
- Baru-Raharjo, I., 2012. Geophysical signatures of volcano-hosted geothermal systems. Universidad de Utah. Tesis de Doctorado.169 pp.
- Benton, A., García, F., Silis, J. y 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 pp.
- Berkthold, A., 1983. Electromagnetic studies in geothermal regions. *Geophys. Surveys*, 6: 173-200.
- Bertrand, E.A., Caldwell, T.G., Hill, G.J., Wallin, E. L., Bennie, S. L., Cozens, N., Onacha, S.A., Ryan, G.A., Walter, C, Zaino, A. y Wameyo, P., 2012. Magnetotelluric imaging of upper-crustal convection plumes beneath the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophy. Res. Lett.*, 39: 1-6, doi/10.1029/2011GL050177/full.
- Bibby, H.M., Risk, G.F., Caldwell, T.G. y Heise, W., 2009. Investigations of deep resistivity structures at theWairakei geothermal field. *Geothermics*, 38: 98-107.
- Bibby, H.M., Caldwell, T.G., Davey, F.J. y Webb, T.H., 1995. Geophysical evidence on the structure of the Taupo Volcanic Zone and its hydrothermal circulation. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 68: 29–58.

- Bigurra- Pimentel, E., 1998. Análisis geoelectrico de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes B.C.S., México. *Geotermia*. Revista Mexicana de Geoenergía, 14(1): 33-41.
- Björnsson, A., Hersir, G. y Bjornsson, G., 1986. Geophysical reconnaissance study of the Hengill high-temperature area SW Iceland. *Geothermal Researches Council Transactions*, 10: 205-210.
- Blakely, R., 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press. United States of America. 441 p.
- Blakely, R.J., 1988. Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada. *Jour. Geophys. Res.*, 93: 817-832.
- Brune, J., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Geophys. Res.* 75: 4997-5009.
- Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18: 605-635.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M. y Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor: *Geophys. Jour. Int.*, 158: 457-469, doi: 10.1111 /j.1365 -246X.2004.02281.x.
- Campa, M.F., and Ramírez, J., 1979. La Evolución Geológica y la Metalogénesis de Guerrero: Universidad Autónoma de Guerrero, Serie Técnico-Científica, Volume 1: Chilpancingo, Guerrero, 84 p.
- Campos-Enríquez, J.O., Urrutia-Fucugauchi, J. y Arroyo-Esquivel, M.A., 1989. Depth estimations to the Curie isotherm from aeromagnetic data and geothermal considerations for the western sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 28 (5): 993-1005.
- Campos-Enríquez, J.O., 1992. Geophysical prospecting for geothermal resources in Mexico. *Geofísica Internacional*, 31 (4): 339-340.
- Canas, J.A., Pujades, L.G., Blanco, M.J., Soler, V. y Carracedo, J.C., 1995. Coda-Q distribution in the Canary Islands. *Tectonophysics*, 246: 245-261.
- Capra, L, Macías, J. L., Espíndola, J. M. y Siebe, C., 1998. Holocene plinian eruption of La Virgen volcano, Baja California, Mexico. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 80: 239-266.
- Caratori-Tontini, F., Davy, B.W., de Ronde, C.E.J., Embley, R.W., Leybourne, M. y Tivey, M.A., 2012. Crustal magnetization of Brothers volcano, New Zealand, measured by autonomous underwater vehicles: geophysical expression of a submarine hydrothermal system. *Econ. Geol.* 107: 1571-1581.
- Centeno-García, E., Guerrero-Suastegui, M., and Talavera-Mendoza, O., 2008. The Guerrero composite terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone, in Draut, A., Clift, P.D., and Scholl, D.W., eds., Formation and Applications of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones. *Geol. Soc. Am. Special Paper* 436: 279-308.
- Centeno-García, E., Busby, C., Busby, M. y Gehrels, G., 2011. Evolution of the Guerrero composite terrane along the Mexican margin, from extensional fringing arc to contractional continental arc. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 123 (9-10): 1776, doi. org/10.1130/B30057.1.
- Chave, A.D. y Jones, A.G., 2012. The magnetotelluric method: Theory and practice: Cambridge, Cambridge University Press, 552 p.

- Chen, W.P. y Molnar, P., 1983. Focal depths of intracontinental and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and mechanical properties of the lithosphere. *Jour. Geophys. Res.* 88: 4183–4214.
- Chen, X. y Shearer, P., 2011. Comprehensive analysis of earthquake source spectra and swarms in the Salton Trough, California, *Jour. Geophys. Res.*, 116, B09309, doi:10.1029/2011JB008263
- Colleta, B. y Angelier, J., 1981. Faulting evolution of Sanata Rosalía, Baja California, Sur, México. In L. Ortlieb y J.Roldan (eds), *Field Guides and Papers: Geology of Northwestern and Southern Arizona*, 265-274.
- Comeau, M.J., 2015. *Electrical Resistivity Structure of the Altiplano-Puna Magma Body and Volcan Uturunco from Magnetotelluric Data*. University of Alberta. 337 pp.
- Cornet, F. H., Helm, J. Poitrenaud, H. y Etchecopar, A., 1997. Seismic and aseismic slips induced by large-scale fluid injections, *Pure Appl. Geophys.*, 150: 563-585, doi:10.1007/978-3-0348-8814-1\_12.
- Corral, A., 2003. Local distributions and rate fluctuations in a unified scaling law for earthquakes, *Phys. Rev. E.* 68, 3, 035102(R), DOI: 10.1103/PhysRevE. 68.035102.
- Cuenot, N., Dorbath, C., Dorbath, L., 2008. Analysis of the microseismicity induced by fluid injections at the EGS site of Soultz-sous-Forêts (Alsace, France): implications for the characterization of the geothermal reservoir properties. *Pure Appl. Geophys.*, 165: 707-828.
- Cumming, W. y Mackie, R., 2010. Resistivity imaging of geothermal resources using 1D, 2D and 3D MT inversion and TDEM static shift correction illustrated by a Glass Mountain case history. *Proceedings world geothermal congress, Bali, Indonesia*, 25–29 April.
- Del Pezzo, E., Bianco, F. y Saccorotti, G., 2002. Influence of the noise fluctuations in the estimate of duration-magnitude. Internal Report, online at [www.ov.ingv.it](http://www.ov.ingv.it).
- Del Pezzo E., Bianco, F. y Saccorotti, G., 2004. Seismic source dynamics at Vesuvius volcano, Italy. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 133: 23-39.
- Delvaux, D., 2011. Version 3.0 and above of the Win-Tensor Program. <http://users.skynet.be/damien.delvaux/Tensor/tensor-index.html> (Available at:).
- Delvaux, D. y Barth, A., 2010. African Stress Pattern from formal inversion of focal mechanism data. Implications for rifting dynamics. *Tectonophysics*, 482: 105-128.
- Delvaux, D. y Sperner, B., 2003. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In: Nieuwland, D. (Ed.) *New Insights into Structural Interpretation and Modelling* 212. *Geological Society, London*, pp. 75–100.
- Díaz, D., Brasse, H. y Ticona, F., 2012. Conductivity distribution beneath Lascar volcano (Northern Chile) and the Puna, inferred from magnetotelluric data. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 217-218; 21–29., doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.12.007.
- Dickinson, W.R., and Lawton, T.F. 2001. Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico: *Geol. Soc. Am. Bull.*, 113 (9): 1142-1160.

- Didana, Y.L. y Heinson, T.G., 2015. Three dimensional conductivity model of the Tendaho High Enthalpy Geothermal Field, NE Ethiopia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 290 (2015) 53–62, doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.11.013.
- Domínguez, T., Rebollar, J. y Fabriol, H., 1997. Attenuation of coda waves at Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 87 (5): 1368-1374.
- Dorbath, L., Cuenot, N., Genter, A. y Frogneux, M., 2009. Seismic response of the fractured and faulted granite of Soultz-sous-Forêts (France) to 5 km deep massive water injections. *Geophysics Journal International*, 117: 653-675, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04030.x.
- Eccles, J.D., Cassidy, J., Locke, C.A. y Sporli, K.B., 2005. Aeromagnetic imaging of the Dun Mountain Ophiolite Belt in northern New Zealand: Insight into the fine structure of a major SW Pacific terrane suture. *Jour. Geol. Soc.*, 162(4):723-735.
- 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.
- Espinosa-Cardena, J. M. y Campos-Enrriquez, J. O., 2008. Curie point depth from spectral analysis of aeromagnetic data from Cerro Prieto geothermal area, Baja California, México. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 176: 601–609.
- Espinosa-Cardena, J.M., Campos-Enrriquez, J.O. y Unsworth, M., 2016. Heat flow pattern at the Chicxulub impact crater, northern Yucatan, Mexico. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 311: 135–149, doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.12.013.
- Estrada, C., y Sandoval, C., 2011. Evolución química e isotópica de pozos productores en el Campo Geotérmico de LasTres Vírgenes B.C.S. 2011. Comisión Federal de Electricidad. Informe institucional DEX-DGQ-TV-07-11. 23 p.
- Evans, K., Moriya, H., Niitsuma, H., Jones, R., Phillips, W., Genter, A., Sausse, J., Jung, R. y Baria, R., 2005. Microseismicity and permeability enhancement of hydrogeologic structures during massive fluid injections into granite at 3 km depth at the Soultz HDR site. *Geophys. J. Int.*, 160(1): 388-412, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02474.x.
- Evans, K., Zappone, A., Kraft, T., Deichmann, N. y Moia, F., 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. *Geothermics*, 41: 30–54, doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.08.002.
- Farrell, J.M., Husen, S. y Smith, R.B., 2009. Earthquake swarm and b-value characterization of the Yellowstone volcano-tectonic system. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 188 (1–3): 260-276.
- Fernández, A., 2014. Funciones de receptor: modos de ruptura y espesor de la litósfera en la región del Golfo de California, México. Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de grado. 73 p.
- Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D. L., Lovera, O.M. y 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 áreas. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 119: 1313-1336.
- Fischer, T. y Horálek, J., 2005. Slip-generated patterns of swarm microearthquakes from West Bohemia/Vogtland (central Europe): Evidence of their triggering mechanism?, *Jour. Geophys. Res.*, 110, B05S21, doi:10.1029/2004JB003363.

- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94 (8): 1193-1211.
- Fujiwara, T., Kimoshita, H. y Morijiri, R., 1999. Magnetic structure of the southern Boso Peninsula, Honshu, Japan, and its implications for the formation of the Mineoka Ophiolite Belt. *Earth Planets Space*, 51, 413-424.
- Gamble, T.D., Goubau, W.M. y Clarke, J., 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, 44(1): 53-68.
- García-Estrada, G. y González-López, M., 1998. Síntesis de los Estudios de Gravimetría, Magnetometría y Termometría en la Zona Geotérmica de las Tres Vírgenes, B.C.S., México, *Revista Geotermia*, Comisión Federal de Electricidad, 14: 15-32.
- Gao, L.S., 1992. Physical Meaning of the coda envelopes. In: *Volcanic Seismology*, P. Gasparini, R. Scarpa, K. Aki (Editors) Springer-Verlag, Berlin, Germany, 391-403.
- García, E.G. y González, L.M., 1998. Síntesis de los estudios de gravimetría, magnetometría en la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S., México. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 14 (1): 15-32.
- Guarduño-Monroy, V. H., Vargas-Ledezma, H. y Campos-Enríquez, J.O., 1993. Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito Baja California, Mexico.: a resurgent-type caldera. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 59: 47-58.
- Garza, R., 2014. Distribución del valor  $b$  debajo del volcán Popocatepetl y su relación con la estructura de la cámara magmática. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Tesis de grado. 162 p.
- Gasperikova, E., Newman, G., Feucht, D. y Arnason, K., 2011. 3D MT characterization of two geothermal fields in Iceland. *GRC Trans.*, 35 (1-2): 1667-1671.
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N., Lee, S.K. y Porkhial, S., 2013. 3-D inversion of MT data from the Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran. *Jour. Appl. Geophys.*, doi:10.1016/j.jappgeo.2013.03.006.
- Goertz-Allmann, B. P., Goertz, A. y Wiemer, S., 2011. Stress drop variations of induced earthquakes at the Basel geothermal site, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09308, doi:10.1029/2011GL047498.
- Gomberg, J., Reasenber, P. A., Bodin, P. y Harris, R. A., 2001. Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes. *Nature*, 411: 462-465.
- Gómez, G. y Rocha, S., 2009. Estudio estructural a detalle en la zona noreste y noroeste del campo geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S. Subdirección de Generación. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios, DEX-DGL-TV-06-09. 52 p.
- Gómez, J. G., Pulido, S., Soto, J. y Sandoval, F., 2010. Modelo geotérmico actualizado del C. G. Las Tres Vírgenes, B. C. S. Informe DEX-DGL-DGFDGQ-TV-05-10, de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, C. F. E., pp 37.
- Gutenberg, R. y Richter, C. F., 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 34: 185-188.
- Guttorp, P., 1987. On least-squares estimation of b-values. *Bull. Seism.Soc. Am.*, 77(6): 2115-2124.

- Hanks, T.C. y Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale, d. *Geophys. Res.*, 84: 2348-2350.
- Hardebeck, J.L. y Shearer, P.M., 2003. Using S/P Amplitude Ratios to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93: 2434-2444.
- Harinarayana, T., Abdul Azeez, K.K., Murthy, D.N., Veeraswamy, K., Eknath Rao, S.P., Manoj, C. y Naganjaneyulu, K., 2006. Exploration of geothermal structure in Puga geothermal field, Ladakh Himalayas, India by magnetotelluric studies. *Jour. Appl. Geophys.*, 58: 280-295.
- Hausback, B.P., Stock, J.M., Dmochowski, J.E., Farrar, S.J., Sutter, K., Verke, P. y Winant, C.D., 2000. To be or not to be a caldera-La Reforma caldera, Baja California Sur, Mexico. Program with Abstracts-Geological Society of America, 32:7, A502.
- Havskov, J. y Macías, M., 1983. A coda-length magnitude scale for some Mexican stations. *Geofísica Internacional*. 22(3): 205-213.
- Havskov, J., Malone, S., McCloug, D. y Crosson, R., 1989. Coda Q for the state of Washington. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 79: 1024-1038.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfess, D. y Müller, B., 2010. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics*, 428 (1-2): 3-15.
- Heise, W., Bibby, H.M., Caldwell, T.G., Bannister, S.C., Ogawa, Y., Takakura, S. y Uchida, T., 2007. Melt distribution beneath a young continental rift: The Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L14313, doi: 10.1029/2007GL029629.
- Hernández, P. y Ramírez, G., 2009. Informe final de resultados de la intervención mecánica del pozo LV-8. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia Las Tres Vírgenes. Informe Interno O-2159-019R-01, RE-04-2009, 18 pp.
- Hernández, P., Sanchez, M., Gómez, G. y Tapia, R., 2010. Informe final de resultados de la perforación y estimulación ácida del pozo LV-6. RTV-RE-03-2010. O-2159-019R-01. Subdirección de Generación, Gerencia de Proyectos termoeléctricos. Residencia Las Tres Vírgenes. Residencia de Estudios CFE. 75 p.
- Hersir, G.P., Björnsson, G. y Björnsson, A., 1990. Volcanos and geothermal activity at the Hengill area: geophysical exploration, Orkustofnun, Report nr. OS-90031/JHD-06, A report in Icelandic, Reykjavík, Iceland, 93 pp.
- Hill, D.P., Reasenber, P.A., Arabaz, W. J., Beroza, G., Brumbaugh, D., Brune, J. N., Castro, R., Davis, S., Depolo, D., Ellsworth, W. L., Gomberg, J., Harmsen, S., House, L., Jackson, S. M., Johnston, M.J., Jones, L., Keller, R., Malone, S., Munguia, L., Nava, S., Pechmann, J. C., Sanford, A., Simpson, R. W., Smith, R. B., Stark, M., Stickney, M., Vidal, A., Walter S, Wong, V., Zollweg, J., 1993. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, Earthquake. *Science*, 260 (5114): 1617-1623.
- Hill, G.J., Caldwell, G., Heise, W., Cas, R.A.F., Cull, J.P., Bibby, H.M., Chertkoff, D.G. y Burgess, M.K., Cull, J.P. y Cas, R.A.F., 2009. Distribution of melt beneath Mount St Helens and Mount Adams inferred from magnetotelluric data. *Nature Geoscience*, 2: 785-789, doi:10.1038/ngeo661.
- Hochstein, M.P. y Soengkono, S., 1997. Magnetic anomalies associated with high temperature reservoirs in the Taupo volcanic zone (New Zealand). *Geothermics*, 26: 1-24.

- Holtkamp, S.G., Pritchard, M.E. y Lohnman, R.B., 2011. Earthquake swarms in South America. *Geophys. Jour. Int.*, 187: 128-146.
- Hoshiba, M., 1991. Simulation of multiple scattered coda wave excitation based on the energy conservation law. *Phys. Earth Planet. Int.*, 67: 123-136.
- Ide, S., Beroza, G. C., Prejean, S. G. y Ellsworth, W. L., 2003. Apparent Break in Earthquake Scaling due to Path and Site Effects on Deep Borehole Recordings. *Jour. Geophys. Res.*, 108, 10.1029/2001JB001617.
- Ingham, M.R., Bibby, H.M., Heise, W., Jones, K.A., Cairns, P., Dravitzki, S., Bennie, S.L., Caldwell, T.G. y Ogawa, Y., 2009. A magnetotelluric study of Mount Ruapehu volcano, New Zealand. *Geophys. Jour. Int.*, 179; 887-904, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04317.x.
- Jin, A. y Aki, K., 1988. Spatial and Temporal correlation between coda Q and seismicity in China. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78: 741-769.
- Jones, A.G. y Groom, R.W., 1993. Strike-angle determination from the magnetotelluric impedance tensor in the presence of noise and local distortion: rotate at your peril!, *Geophys. Jour. Int.*, 113: 524-534.
- Jones, L. E. y Helmberger, D. V., 1996. Seismicity and stress-drop in the eastern Transverse ranges, southern California. *Geophys. Res. Lett.*, 23 (3): 233- 236.
- Johnson, H.P., Karsten, J.K., Vine, F.J., Smith, G.C. y Schonharting, G., 1982. A low level magnetic survey over a massive sulfide ore body in the Troodos ophiolite complex. Cyprus. *Mar. Technol. Soc. Jour.*, 16: 76-80.
- Karastathis, V. K., Papoulia, J., Makris, J., Tsambas, A., Stampolidis, A. y Papadopoulos, G. A., 2011. Deep structure investigations of the geothermal field of the North Euboean Gulf, Greece, using 3-D local earthquake tomography and Curie Point Depth analysis. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 206: 106-120.
- Karing, D.E. y Jensky, W., 1972. The proto-gulf of California. *Earth and Planetary Science Lett.*, 17: 169-174.
- Kaufman, A.A., y Keller, G.V., 1981. *The Magnetotelluric Sounding Method*, Elsevier, Amsterdam.
- Kaven, J.O., Hickman, S.H. y Davatzes, N.C., 2012. Mapping of Fluid Compartments with Micro-Seismicity and Seismic Velocities Within the Coso Geothermal Field, California”, Proceedings 37th Workshop on geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 30 – February 1, 2012, SGP-TR-194, 8p.
- Kelbert, A., Meqbel, N., Egbert, G.D. y Tandon, K., 2013. ModEM: A Modular System for Inversion of Electromagnetic Geophysical Data, submitted to Computers and Geosciences
- Klein, F. W., 1985. User's Guide to HYPOINVERSE, a Program for VAX and Professional 350 Computers to Solve for Earthquake Locations, U.S. Geological Survey Open-File Report 85-515, 53 pp.
- Kossobokov y Keilis-Borok., 2000. Implications of a Statistical Physics Approach for Earthquake Hazard Assessment and Forecasting. *Pure Appl. Geophys.*, 157 (11): 2323-2349.
- Kundu, B., Legrand, D., Gahalaut, K., Mahesh, P.Kamesh, R. K., Catherine, J., Ambikapthy, A. y Chadha, R., 2012. The 2005 volcano-tectonic swarm in the Andaman Sea: triggered by the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake. *Tectonics*, 31, TC5009, doi:10.1029/2012TC003138.

- Kwiatek, G., Bohnhoff, M., Dresen, G., Schulze, A., Schulte, T., Zimmermann, G. y Huenges, E., 2010. Microseismicity induced during fluid-injection: a case study from the geothermal site at Groß Schönebeck, North German Basin. *Acta Geophys.* 58: 995-1020.
- Kwiatek, G., Bulut, F., Bohnhoff, M., Dresen, G., 2014. High-resolution analysis of seismicity induced at Berlin geothermal field, El Salvador. *Geothermics*, 52: 98-111.
- Ledo, J., 2005. 2-D versus 3-D magnetotelluric data interpretation, *Surv. Geophys.*, 26: 511-543.
- Lee, W.H. y Lahr, J. C., 1975. HYPO71 (revised). A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey, Open-File report 75 - 311, 114 pp.
- Legrand, D., Barrientos, S. Bataille, K. Cembrano, J. J., 2011. The fluid-driven tectonic swarm of Fjordo Aysen, Chile (2007) associated with two earthquakes (Mw=6.1 and Mw=6.2) within the Liquiñe-Ofqui Fault Zone, submitted to Continental Shelf Research, 3, N3-4, 154-161.
- Legrand, D., Espíndola, J. M., Jiménez, Z., Scolamacchia, T., Valdés-González, C., Singh, S. K., Lermo, J. Spica, Z. y Valenzuela, R.W., 2014. Comparison of the Seismicity Before and After the 1982 El Chichón Eruption. *Active Volcanoes of the World*, doi:1007/978-3-642-25890-9\_5. 97-114.
- Lermo, J., Antayhua, Y., Quintanar, L. y Lorenzo C., 2008. Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos, *Geotermia*, Revista Mexicana de Geoenergía, 21 (1): 25-4.
- Lermo, J., Vargas, A., Urban, E., Rodríguez, H., Núñez, E. y Espitia, G., 2010. Estudio de sismica pasiva en Las Tres Vírgenes, BCS., Periodo 2010, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, proyecto CFE-DEV-DGF-TV-25-10, México.
- Lermo, J., Vargas, A., Urban, E., Rodríguez, H., Núñez, F., Espitia, G., Martínez, J., 2011. Estudio de sismica pasiva en Las Tres Vírgenes, B.C.S. Periodo 2011. Informe Técnico, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, 97 p.
- Lienert, B.R.E., Havskov, J., 1995. A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismol. Res. Lett.* 66, 26-36. Lienert, B.R.E. y Havskov, J., 1995. A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismol. Res. Lett.* 66: 26-36.
- 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.
- López, A., Casarrubias, Z. y Leal, R., 1993. Estudio Geológico regional de la zona geotérmica de Tres Vírgenes, BCS, Informe OGL/BC/002/93 de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE., Julio 1993, 48 pp.
- 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.

- 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)*, 2: 707- 712.
- López, H.A., 1998. Synthesis of the regional geology at the Las Tres Vírgenes geothermal zone, B.C.S, Mexico. *Geotermia*, 14: 3-14.
- López-Loera, H., Urrutia-Fucugauchi, J. y Alva-Valdivia-L., 2011. Estudio aeromagnético del complejo volcánico de Colima, occidente de México-implicaciones tectónicas y estructurales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28 (3): 349-370.
- Lorenzo-Pulido, C. y Soto-Peredo, J., 2013. Sismicidad en el complejo volcánico de Las Tres Vírgenes, B.C.S. *Geotermia*, 26(1): 34-43.
- Londoño, M., 1996. Temporal change in coda Q at Nevado El Ruiz Volcano, Colombia. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 73: 129-139.
- Macías, M., 1997. Análisis de la información sísmica del campo geotérmico de Tres Vírgenes, B.C.S. periodo Enero-Abril de 1994. Tesis de grado.
- Macías, J. L., Arce, J. L., Garduño-Monroy, V. H., Ramón, D., García, L., Reyes, G., Rangel, E., Saucedo, R., Cisneros, G. y Navarrete, J. A., 2011. Estudio de estratigrafía y geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. Informe Final, Instituto de Geofísica, UNAM, CFE- Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos, *Convenio: 9400060892, DEX-DGL-TV-17-11*. Junio del 2011, pp 104.
- Macías, J. L. y Jiménez, S., 2012. Actualización vulcanológica del complejo de Las Tres Vírgenes, BCS. Memorias del XX Congreso Anual-I Congreso Geotérmico Latinoamericano. Morelia, Mich., México. 8 p.
- Macías, J. L. y Jiménez, S., 2013. Estudio de Estratigrafía y Geología del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. *Revista Mexicana de Geoenergía* ISSN 0186 5897, *Geotermia*, 26 (1): 14-23.
- Madariaga, R., 1976. Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66 (3): 639-666.
- Majer, E.L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., Asanuma, H., 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36, 185–222.
- Mackie, R.L., Smith, J.T. y Madden, T., 1994. Three-dimensional electromagnetic modelling using finite-difference equations: the magnetotelluric example. *Radio Sci.*, 29: 923–935.
- Mandal, P., Rastogi, B. K. y Sarma, C. S. P., 1998. Source parameters of Koyna earthquakes, India. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88 (3): 1-10.
- Martini, M., Ferrari, L., López-Martínez, M., Cerca-Martínez, M., Valencia, V. y Serrano-Duran, L., 2009. Cretaceous-Eocene magmatism and Laramide deformation in south-western Mexico: No role for terrane accretion, in Kay, S.M., Ramos, V.A., and Dickinson, W.R., eds., Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Memoir 204: 151-182, doi: 10.1130/2009.1204(07).
- Maxwell J. C., 1861. Fourth Series; Part I, Theory of Molecular Vortices applied to Magnetic Phenomena; Part II, Theory of Molecular Vortices applied to Electric Currents; Part III, Theory of Molecular Vortices applied to Statical Electricity; Part IV, Theory of

- Molecular Vortices applied to the Action of Magnetism on Polarized Light. On Physical Lines of Force. *Philosophical Magazine and Journal Science*.
- Maxwell, S., Shemeta, C., Campbell, J. y Quirk, D., 2009. Microseismic Deformation Rate Monitoring. EAGE Passive Seismic Workshop, Cyprus, A18.
- Meridee J.C., 1995. Structural controls of Holocene reactivation of the Meer fault, Southwestern Oklahoma, from magnetic studies. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107 (1): 98-112.
- McNeice, G.W. y Jones, A.G., 2001. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics*, 66: 158-173, doi:10.1190/1.1444891.
- McNutt, S.R., 2005. "Volcanic Seismology": *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, v. 33, p. 461-491.
- Meissner, R. y Strehlau, J., 1982. Limits of stress in the continental crust and their relation to depth-frequency distribution of shallow earthquakes. *Tectonics*, 1: 73-89.
- Michels, A., Church, N. y McEncore, Z., 2014. Characterization of the magnetic properties of the Leka Ophiolite Complex. New trends on Paleo. *Rock and Environmental Magnetism*, Castle Meeting, Évora.
- Mogi, K., 1963. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper). *Bull. Earth. Res. Inst.*, 41: 615-658.
- Moncayo, E., Vargas, C. y Durán, J., 2004. Temporal variation of Coda-Q at Galeras Volcano Colombia. *Earth Sci. Res. Jour.* 8 (1): 19-24.
- Monsalve, H., 2007. Atenuación y tomografía de ondas de coda en la zona epicentral del sismo del Quindío Mw=6.2 (Colombia) utilizando sismicidad Local. Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería – CEIFI Universidad del Quindío Armenia. 100 p.
- Moore, T.E., 1983. Geology, petrology and tectonic significance of paleoceanic terranes of the Vizcaino Peninsula, Baja California Sur, Mexico. Stanford University, tesis de Grado, 376 pp.
- Morandi, M., Aragón-Arreola, M., Delgado, L. y González, A., 2002. Evolución de las cuencas Yaqui y Guaymas, a partir de interpretación de sísmica de reflexión marina. XI Congreso Venezolano de Geofísica.
- Mossop, A. P., 2001. Seismicity, subsidence and strain at The Geysers geothermal field. Ph.D. dissertation, Stanford University.
- Mukuhira, Y., Asanuma, H., Niitsuma, H. y Haring, M.O., 2013. Characteristics of large-magnitude microseismic events recorded during and after stimulation of a geothermal reservoir at Basel, Switzerland. *Geothermics*. 45: 1-17.
- Murru, M., Montuori, C., Wyss, M. y Privitera, E., 1999. The locations of magma chambers at Mt. Etna, Italy, mapped by b-values. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (16): 2553-2556, doi: 10.1029/1999GL900568.
- Neunhöfer, H. y Hemmann, A., 2005, Earthquake swarms in the Vogtland/Western Bohemia region: Spatial distribution and magnitude-frequency distribution as an indication of the genesis of swarms?. *Jour. Geodyn.*, 39: 361-385, doi:10.1016/j.jog.2005.01.004.

- Newman, G.A., Gasperikova, E., Hoversten, G.M. y Wannamaker, P.E., 2008. Threedimensional magnetotelluric characterization of the Coso geothermal field. *Geothermics*, 37: 369–399.
- Nicol, A., Carne, R., Gerstenberger, M. y Christophersen, A., 2011. Induced seismicity and its implications for CO2 storage risk. *Energy Procedia*, 4: 3699-3706.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., Silva-Romo, G., Eguiza-Castro, M.H. y Mendoza-Rosales, C.C., 2006. Latest Cretaceous to Miocene deformation events in the Eastern Sierra Madre del sur, Mexico, inferred from the geometry and age of major structures. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 118(1/2): 1868-1882; doi:10.1130/B25734.1.
- Nieuwenhuis G, Unsworth, M.J., Pana, D., Craven, J. y Bertrand, E., 2014. Three-dimensional resistivity structure of Southern Alberta, Canada: implications for Precambrian tectonics, *Geophy. Jour. Inter.*, 1-22; doi:10.1093/gji/ggu068.
- Nurhasan, Ogawa, Y., Ujihara, N., Tank, S.B., Honkura, Y., Onizawa, S., Mori, T. y Makino, M., 2006. Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system. *Earth Planets Space*, 58: 1055–1059.
- NOankwo, L. y Shehu, A.T., 2015. Evaluation of Curie-point depths, geothermal gradients and near-surface heat flow from high-resolution aeromagnetic (HRAM) data of the entire Sokoto Basin, Nigeria. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 305: 45-55.
- Okubo, Y., Graf, R.J., Hansen, R.O., Ogawa, K. y Tsu, H., 1985. Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding area, Japan. *Geophysics*, 50 (3): 481-489; doi.org/10.1190/1.1441926.
- Okubo, Y, Tsu, H., y Ogawa, K., 1989. Estimation of Curie point temperature and geothermal structure of island arcs of Japan. *Tectonophysics*, 159: 279-290.
- Oskooi, B., Pedersen, L.B., Smirnov, M., Árnason, K., Eysteinnsson, H., Manzella, A., 2005. The deep geothermal structure of the Mid-Atlantic Ridge deduced from MT data in SW Iceland. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150: 183–195.
- Otemöller, L., Voss, P. y Havskov, J., 2015. Seisan Earthquake Analysis Software. <http://seisan.info> 423 pp.
- Oye, V., Bungum, H. y Roth, M., 2005. Source parameters and scaling relations for mining-related seismicity within the Pyhäsalmi ore mine, Finland. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95 (3): 1011-1026, doi: 10.1785/0120040170.
- Palma-Guzmán, S.H., 1998. Modelado de datos magnetotelúricos en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., México, *Geotermia*, 14(1): 43-53.
- Parkinson, W.D., 1959. Directions of rapid geomagnetic variations. *Geophys. J. Roy. Astronom. Soc.*, 2: 1-14.
- Paul, A., Gupta, S. y Pant, C., 2003. Coda Q estimates for Kamaun Himalaya. *Earth Planet*, 112 (4): 569-576.
- Pearson, C., 1981. The relationship between microseismicity and high pore pressures during hydraulic stimulation experiments in low permeability granitic rocks. *Jour. Geophys. Res.*, 86(B9): 7855 -7864, doi:10.1029/JB086iB09p07855.

- Persaud, P., Pérez-Campos, X. y Clayton R.W., 2007. Crustal thickness variations in the margins of the Gulf of California from receiver functions. *Jour. Int.*, 170 (2): 687-699.
- Portugal, E., Birkle, P., Barragan, R.R.M., Arellano, G.V.M., Tello, E., Tello, M., 2000. Hydrochemical-isotopic and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Virgenes geothermal field, Baja California Sur, Mexico. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 101 (3-4): 223-244.
- Prejean, D. P., Hill, E. E., Brodsky, S. E., Hough, M., Johnston, J. S., Malone, S. D., Oppenheimer, D. H., Pitt, A. M. y Richards-Dinger, K. B., 2004. Remotely Triggered Seismicity on the United States West Coast following the Mw 7.9 Denali Fault Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94 (6B): S348-S359.
- Pujades, L. G., Ugalde, A., Canas, J. A., Navarro, M., Badal, F. J. y Corchete, V., 1997. Intrinsic and scattering attenuation from observed seismic codas in the Almeria basin (southeastern Iberian peninsula). *Geophys. Jour. Int.*, 129: 281-291.
- Ramos-Pérez, E. y Lermo-Samaniego, J., 2015. Localiación de los cuerpos magmáticos en campos geotérmicos a partir del análisis de la atenuación de la onda S por medio de sismogramas. Reunión Anual dela Unión Geofísica Mexicana, 2 al 7 de noviembre de 2015. Libro de resúmenes, SIS-24, p. 149.
- Reasenberg, P. y Oppenheimer, D., 1985. Fpfit, fpplot, and fppage: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault plane solutions. Technical report, U.S. Geol. Survey.
- Reynolds, J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. New York: John Wiley y Sons.
- Richardson, E. y Jordan, T. H., 2002. Seismicity in deep gold mines of South Africa: Implications for tectonic earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92 (5): 1766-1782, doi: 10.1785/0120000226.
- Rocha, S. y Romero, F., 2009. Estudio estructural en la zona noreste y noroeste del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S. DEX-DGL-TV-06-09. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios, CFE (52 pp.).
- Rodríguez, M., 2000. Procesado e interpretación de datos sísmicos registrados en la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S. en el periodo Diciembre 1995-Julio 1996. Informe elaborado para la Gerencia de Proyectos Termoeléctricos. Enero de 1999.
- 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.
- Romo-Jones, J. M., Wong-Ortega, V., Flores-Luna, C. y Vázquez-González, R., 2000. Conductividad eléctrica y atenuación de ondas de coda en el campo geotérmico las tres vírgenes en baja california sur, México. *GEOS*, 20 (1): 21-29.
- 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.

- Romo, J.M., Gómez-Treviño, E. y Antonio-Carpio, R.G., 2005. New magnetotelluric response functions for geothermal applications. Proceedings World Geothermal Congress 2005, 1-8.
- Rosales-Rodríguez, J., Lee Bandy, W. y Centeno-García, E, 2014. Profundidad de la base de la fuente magnética y estructura térmica del Golfo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31 (2): 190-202.
- Ross, H.E., Blakely, R.J. y Zoback, M.D., 2006. Testing the use of aeromagnetic data for the determination of Curie depth in California. *Geophysics*, 71 (5): L51-L59, doi.org/10.1190/1.2335572.
- Rubin, A. M., 1995a. Getting granite dikes out of the source región. *Jour. Geophys. Res.*, 100: 5911-5929.
- Rubin, A. M., 1995b. Propagation of magma-filled cracks, *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 23: 287-336.
- Sanchez, J.J., McNutt, S.R., Power, J. A., y Wyss, M., 2004. Spatial variations in the frequency-magnitude distribution of earthquakes at Mount Pinatubo volcano. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94 (2): 430-438.
- Sánchez, J. J., Gómez, D. M., Torres, R. A., Calvache, M. L., Ortega, A., Ponce, A. Acevedo, P., Gil-Cruz, F., Londoño, J. M., Rodríguez, S. P., Patiño, J. y Bohórquez, O. P., 2005. Spatial mapping of the b-value at Galeras volcano, Colombia, using earthquakes recorded from 1995 to 2002. *Earth Sci. Res. Jour.*, 9 (1): 29-35.
- Sandri y Marzocchi, 2007. A technical note of the bias in the estimation of the b-value and its uncertainty through the Least Squares technique. *Annals of Geophysics*, 50 (3): 329-339.
- Sato, H., 1977. Energy propagation including scattering effects. Single isotropic scattering approximation. *Jour. Phys. Earth.*, 25: 27-41.
- Savvaidis, A.S., Tsokas, G.N., Papazachos, C.B. y Kondopoulou, D., 2000. A geophysical study of the ophiolite complex and the sedimentary basins in the northwest part of the Chalkidiki Peninsula (Greece). *Surveys in Geophysics*, 21: 567-595.
- Sawlan, M.G., 1986. Petrogenesis of late Cenozoic volcanic rocks from Baja California Sur, Mexico. Ph.D. thesis: Santa Cruz, University of California, 174 p.
- Schmidt, E.K., 1975. Plate tectonics, volcanic petrology and ore formation in the Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. Master Thesis, University of Arizona.
- Sedlock, R.L., Ortega-Gutiérrez, F. y Speed, R.C., 1993. Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Special Paper 278, 153 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2007. Carta geológica-Minera Santa Rosalía, G12-1 Baja California Sur, Esc. 1:250,000. <http://mapasims.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2008. Carta Magnética de Campo Total Estatal Baja California Sur., Esc.1:500,000. <http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas Online/geofisica/california sur.pdf>
- Shearer, P.M., 1999. Introduction to Seismology. Cambridge University Press.

- Shelly, D. R., Hill, D.P., Massin, F., Farrell, J., Smith, R.B. y Taira, T., 2013. A fluid- driven earthquake swarm on the margin of the Yellowstone caldera. *Jour. Geophys. Res.: Solid Earth*, 118: 4872-4886, doi:10.1002/jgrb.50362.
- Scherbaum, F. y 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. *Seismol. Soc. Am.* 74 (6): 2577-2592.
- Shi, Y. y Bolt, B.A., 1982. The standard error of the magnitude-frequency b-value. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72: 1677-1687
- Scholz, C.H., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 439.
- Schmitt, A.K., Stockli, D.F., Hausback, B.P., 2006. Eruption and magma crystallization ages of Las Tres Vírgenes (Baja California) constrained by combined  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  and  $(\text{U}-\text{Th})/\text{He}$  dating of zircon. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 158: 281-295.
- Schmitt, A. K., Stockli, D. F., Niedermann, S., Lovera, O. M. y Hausback, B.P., 2010. Eruption ages of Las Tres Vírgenes volcano (Baja California): A tale of two helium isotopes. *Quaternary Geochronology*, 5: 503-511.
- Singh, S. y Herrmann, R., 1983. Regionalization of Crustal Coda Q in the Continental United States. *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, B1, 527-538. Smithson S. B., P. N. Shive and S. K. Brown (1977). *Seismic Velocity, reflections and structure of the crystalline crust, in the Earth's Crust*, Geophys. Monogr. Ser., vol. 20, edited by J. G. Heacock, pp. 254-270, AGU, Washington, D.C.
- Siripunvaraporn, W. y Egbert, G., 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, 65: 791-803.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G.D., Lenbury, Y. y Uyeshima, M., 2005, Three dimensional magnetotelluric inversion: Data subspace method. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150: 3-14, doi:10.1016/j.pepi.2004.08.023.
- Siripunvaraporn, W. y Egbert, G., 2009. WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173: 317-329.
- Sminchak, J. y Gupta, N., 2003, Aspects of induced seismic activity and deep-well sequestration of carbon dioxide. *Environmental Geosciences*, 10 (2): 81-89.
- Smith, R.B. y Bruhn, R.L., 1984. Intraplate extensional tectonics of the eastern Basin Range: inferences on structural style from seismic reflection data, regional tectonics, and thermal-mechanical models of brittle-ductile deformation. *Jour. Geophys. Res.*, 89: 5733-5762.
- Snoke, J. A., Munsey, J. W., Teague, A. G. y Bollinger, G. A., 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data. *Earthquake notes*, 55 pp.
- Soto, J., Lorenzo, C. y Palma, H., 2010. Reporte del Sismo del 13 de Agosto de 2010, Magnitud 3.5 en Las Tres Vírgenes, B.C.S. Informe DGF-SIS-MX-03/10, Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos, CFE., Agosto 2005, 15 pp.

- Soto-Peredo, J., 2014. Determinación de mecanismos focales compuestos como herramienta para la localización de objetivos de perforación en el Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., México. *Geotermia*, Revista Mexicana de Geoenergía, ISSN 0186 5897, 27(2): 3-12.
- Spector, A. y Grant, F.S., 1970. Statistical model for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35 (2): 293-302, doi.org/10.1190/1.1440092.
- Spichak, V., Zakharova, O. y Rybin, A., 2007. Estimation of the sub-surface temperatura by means of magnetotelluric sounding. PROCEEDINGS, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 22-24, 2007 SGP-TR-183.
- Stark, M.A. 2003. Seismic evidence for a long-lived enhanced geothermal system (EGS) in the Northern Geysers Reservoir, *Geothermal Resourc. Counc. Transactions*, 27: 727-731.
- Stein, S. y Wysession, M. 2003. Introduction to seismology, earthquakes and earth structure. Blackwell Publishing, 498 pp.
- Stock, J. M. y Hodges, K. V., 1989. Pre-Pliocene extensión around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate. *Tectonics*, 8: 99-115.
- Stock, J.M. y Lee, J., 1994. Do microplates in subduction zones leave a geological record?. *Tectonics*, 13: 1472-1488.
- Subba-Rao, P.B.V., Radhakrishna, M., Haripriya, K., Someswara, B. y Chandrasekharam, D., 2016. Magnetic anomalies over the Andaman Islands and their geological significance. *Jour. Earth Syst. Sci.*, 125: 359; doi:10.1007/s12040-016-0660-7.
- Sumy, D., Gaherty, J., Won-Young, K. 2013. The Mechanisms of Earthquakes and Faulting in the Sohthern Gulp of California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103 (1): 487-506.
- Suckale, J., 2009. Induced seismicity in hydrocarbon fields. *Adv. Geophys.* 51, 55–106.
- Swift C.M., 1967. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southewestern United State. Tesis Doctoral, M. I. T.
- Tardy, M., Lapierre, H., Freydier, C., Coulon, C., Gill, J.B., Mercier de Lepinay, B., Beck, C., Martinez, J., Talavera, M., Ortiz, E., Stein, G., Bourdier, J.L., and Yta, M. 1994. The Guerrero suspect terrane (western Mexico) and coeval arc terranes (the Greater Antilles and the Western Cordillera of Colombia): A late Mesozoic intra-oceanic arc accreted to cratonal America during the Cretaceous: *Tectonophysics*, 234 (4): 49-73.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. y Keys, D.A., 1990. *Appl. Geophys.*, 2nd edition. Cambridge University Press, 770 pp.
- Tikhonov, A. N., 1950. Determination of the electrical characteristics of the deep strata of the earth's crust: *Doklady Akadamaia Nauk*, 73: 295–297.
- Tivey, M. A. y Dymant, J., 2010. The magnetic signature of hydrothermal systems in slow spreading environments. In: Rona, P., Devey, C., Murton, B. (Eds.), *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*, Geophysical Monograph Series v.188. AGU, Washington DC, pp. 43–65.
- Tomic, J., Abercrombie, R. E., do Nascimento, A. F., 2009. Source parameters and rupture velocity of small  $M \leq 2.1$  reservoir induced earthquakes. *Geophys. Jour. Int.* (2009) doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04233.x.

- USGS, 2016. Volcano Hazard Program, Glossary Terms. Seismic swarm. [https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/seismic\\_swarm.html](https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/seismic_swarm.html)
- Utsu, T., 1965. A method for determining the value of b in a formula  $\log N=a-bM$  showing the magnitude frequency for earthquakes. *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 13, 99–103.
- Utsu, T., 1984. Estimation of Parameters for Recurrence Models of Earthquakes. *Bull. Earthq. Res. Ins.Univ. Tokyo*, 59: 53-66.
- Valdés, C., 2009. Estudio de Sísmica Pasiva en el Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán. Informe: DEX-DGF-AZ-16-09, Convenio 9400046743., 56 pp.
- 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 CLSGPG-003-94/CFE-CICESE*, GPG-CFE, 175 pp.
- Vargas, C. A., C. Pérez, y Chacón, S., 2006. Coda Q Tomography In the Nevado del Ruiz Volcano (Colombia) for The Volcanic Crisis Of June 8-9th And August 1-2nd, 2002 In: Simposio Cities On Volcanoes 4, 2006, Ecuador.
- Venkataraman, A., y Kanamori, H., 2004. Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes, *Jour. Geophys. Res.* 109, B04301, doi: 0431.01029JB002549.
- Verma, S. P., Pandarinath, K., Santoyo, E., Gonzalez-Partida, E., Torres-Alvarado, I.S. y Tello-Hinojosa, E., 2006. Fluid chemistry and temperatures prior to exploitation at the Las Tres Vírgenes geothermal field, Mexico. *Geothermics*, 35 (2): 156-180.
- Vidale, J. y Shearer P., 2006. A survey of 71 earthquake bursts across southern California: Exploring the role of pore fluid pressure fluctuations and aseismic slip as drivers. *Jour. Geophys. Res.*, 111, B05312, doi:10.1029/2005JB004034.
- Viegas, G. y Hutchings, L., 2011. Characterization of induced seismicity near an injection well at the Northwest Geysers Geothermal Field, California. *GRC Trans.* 35, 1773–1780.
- Vollmer, F. W., 2015. Orient 3: Spherical projection and orientation data analysis software. [www.frederickvollmer.com](http://www.frederickvollmer.com).
- Volpi, G., Manzella, A. y Fiordelisi, A., 2003. Investigation of geothermal structures by magnetotellurics (MT): an example from the Mt. Amiata area, Italy. *Geothermics*, 32: 131-145.
- Wadati, H., 1933. In: Bath. M., 1973. Introduction of seismology. Birkhauser Verlag Vasel, 395p.
- Wannamaker, P.E., Doerner, W.M. y Hasterok, D. P., 2007. Integrated dense array and transect MT surveying at Dixie Valley geothermal area, Nevada; structural controls, hydrothermal alteration and deep fluid sources, Proceedings 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, SGP-TR-183, 6 pp.
- Warren, N. W. y Latham, G. V., 1970. An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity, *Jour. Geophys. Res.*, 75: 4455-4464.
- Wiemer, S., y McNutt, S. R., 1997. Variations in the frequency-magnitude distribution with depth in two volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mt. Spurr, Alaska. *Geophys. Res. Lett.*, 24(2): 189-192.

- Wiemer, S., y Wyss, M., 2002. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes, *Adv. Geophys.*, 45: 259-302.
- Wiese, H., 1962. Geomagnetische Tiefentellurik Teil II: die Streichrichtung der Untergrundstrukturen des elektrischen Widerstandes, erschlossen aus geomagnetischen Variationen. *Pure Appl. Geophys.*, 52: 83-103.
- Wilson, I. F., 1948, Buried topography, initial structures, and sedimentation in Santa Rosalía area, Baja California, Mexico: *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, v. 32, p. 1762-1807. (Also published in Spanish in Mexico, Univ. Nac., Inst. Geologia Bol. 53, 78 p.
- Woessner, J. y Wiemer, S., 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95 (2): 684-698, doi:10.1785/0120040007.
- 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.
- Wong, V., Rebollar, C. J., y Munguía, L., 2001. Attenuation of Coda Waves at the Tres Vírgenes Volcanic Area, Baja California Sur, México. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 91 (4): 683-693.
- Wong, V. y Murguía, L., 2006. Seismicity, focal mechanisms, and stress distribution in the Tres Vírgenes volcanic and geothermal region, Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*. 45 (1): 23-37.
- Wyss, M., 1973. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 31: 341-359.
- Wyss, M., Klein, F., Nagamine, K. y Wiemer, S., 2001. Anomalously high *b*-values in the South Flank of Kilauea volcano, Hawaii: evidence for the distribution of magma below Kilauea's East rift zone. *Jour. Vol. Geother. Res.*, 106: 23-37.
- Yamada, T., Mori, J., Ide, S. y Abercrombie, R., 2007. Stress drops and radiated seismic energies of microearthquakes in a South African gold mine. *Jour. Geophys. Res.*, 112, B03305, doi: 10.1029/2006JB004553.
- Zollo, A., Judenherc, S., Auger, E., D'Auria, L., Virieux, J., Capuano, C., Chiarabba, C., de Franco, R., Makris, J., Michelini, A. y Musacchio, G., 2002. Evidence for the buried rim of Campi Flegrei caldera from 3-d active seismic imaging. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (19): 1-4; doi:10.1029/2003GL018173.
- Zúñiga, F.R. y Wyss, M., 2001. Most-and least-likely locations of large to great earthquakes along the Pacific coast of Mexico estimated from local recurrence times based on *b*-values. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 91 (6): 1717-1728.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1.** a) Ubicación geográfica de los campos geotérmicos de México y tectónica regional del Golfo de California. b) Ampliación del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y ubicación de la ciudad de Santa Rosalía. El polígono en amarillo representa al Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM); los triángulos en rojo, los volcanes del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV). AG= Caldera El Aguajito; RE= Caldera La Reforma.
- Figura 1.2.** a) Ubicación de los perfiles de resistividad A-A' y B-B' con dirección SO-NE, elaborados por [Romo et al. \(2005\)](#). b y c) Resultados de la distribución de la resistividad en profundidad, obtenidos a partir de la inversión 2D. Los rectángulos centrales en color blanco muestran la ampliación de las zonas conductoras superficiales asociadas con la estratigrafía del CVGTV.
- Figura 1.3.** Modelo geotérmico de Las Tres Vírgenes, elaborado por [López et al. \(1993\)](#).
- Figura 1.4.** Modelo bidimensional de los perfiles gravimétricos y magnéticos (reducido al polo) ([García y González, 1998](#)). a) Los círculos y línea continua en color rojo representan los datos gravimétricos observados y modelados; asimismo, las cruces y línea continua en color azul representan a los datos magnéticos observados y modelados. Las unidades gravimétricas y magnéticas son miligales (mgal) y nanoteslas (nT) respectivamente. b) Interpretación del modelo bidimensional y su correlación con la estratigrafía del CVGTV representadas por bloques en color anaranjado. La elevación está dada en metros (m).
- Figura 1.5.** Modelo geotérmico de Las Tres Vírgenes, elaborado por [Gómez et al. \(2010\)](#).
- Figura 1.6.** Modelo hidrogeológico conceptual de Las Tres Vírgenes, elaborado por [Benton et al. \(2011\)](#) con orientación N-S.
- Figura 1.7.** Actualización del modelo conceptual de [Gómez et al. \(2010\)](#), con la integración de la sismicidad registrada en el periodo 2000-2011 ([Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo, 2013](#)).
- Figura 1.8.** Perfil en dirección NO-SE, con la integración de estudios tectónicos, sísmicos y de resistividad para la propuesta de perforación de un nuevo pozo, en el CVGTV ([Soto-Peredo, 2014](#)).
- Figura 2.1.** Reconstrucción tectónica de la Península de Baja California. a). Configuración inicial de la Península de Baja California. b) Apertura y formación del proto-golfo ([Stock y Hodges, 1989](#); [Fletcher et al., 2007](#); [Fernández, 2014](#)). c) Configuración actual del Golfo de California. Las flechas en colores negro y blanco indican el movimiento relativo de placas y la separación del Golfo de California respectivamente. Las líneas en color blanco representan las provincias fisiográficas ([modificado de Fletcher et al., 2007 y Fernández, 2014](#)).

- Figura 2.2.** Principales estructuras volcánicas y formación del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes durante el Mioceno-Plioceno (Macías et al., 2011).
- Figura 2.3.** a) Terrenos tectono-estratigráficos y geología regional del estado de Baja California Sur. Las líneas discontinuas en color rojo separan los terrenos tectonoestratigráficos: Vizcaíno o Cochimi (A), Alisitos-Guerrero o Yuma (B) y Caborca o Seri (C) (Moore, 1983; Sedlock et al., 1993; Centeno-García et al., 2008, 2011). En la parte central se muestra el arco y/o antearco de Alisitos (polígono en color rojo) (Tardy et al., 1994; Dickinson y Lawton, 2001). El cuadro en color rojo muestra la ubicación del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) dentro del terreno Alisitos-Guerrero (B) (Modificado del SGM, 2003; Centeno-García et al., 2011). b) Ampliación del complejo ofiolítico de Puerto Nuevo, ubicado en el terreno Vizcaíno (A) (Moore, 1983).
- Figura 2.4.** a) Mapa geológico estructural y b) perfil estratigráfico, en dirección SO-NE del CVGTV; ambos elaborados por Gómez y Rocha (2009). LV-1 a LV-13 son los pozos perforados. Las líneas en colores azul y rojo (pozo LV6) muestran las profundidades máximas de perforación.
- Figura 2.5.** Mapa geológico y perfil estratigráfico en dirección SO-NE del CVGTV elaborados por Benton et al. (2011). La escala vertical está dada en metros sobre el nivel mar (msnm) y la distancia en kilómetros (km).
- Figura 2.6.** a) Mapa geológico-vulcanológico y b) perfil estratigráfico en dirección SO-NE del CVGTV elaborados por Macías et al. (2011). Las elevación y la distancia del perfil está dada en kilómetros (km).
- Figura 2.7.** a) Mapa tectónico local, sintetizado de los estudios de López et al. (1993), Gómez y Rocha (2009), Benton et al. (2011), Macías et al. (2011), Macías y Jiménez (2012, 2013) y ubicación de los pozos. AG= caldera El Aguajito; RE= caldera La Reforma. b) Ampliación de la zona central del CVGTV e identificada, en la Figura 2.7a, con un recuadro de color rojo transparente.
- Figura 2.8.** Columna estratigráfica elaborada a partir de muestras de roca obtenidas cada 10 m, durante la perforación del pozo productor LV6 (lado derecho) y descripción resumida de la columna estratigráfica del pozo productor LV6 (lado izquierdo).
- Figura 3.1.** a). Sismicidad regional de la Península de Baja California obtenida del catálogo del Servicio Sismológico Nacional (SSN) entre los años 2006 y 2013. b) Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), principales sistemas de fallas y sismicidad con magnitudes mayores a 3.0.
- Figura 3.2.** Localización de las estaciones sísmicas instaladas en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes. Los triángulos en color rojo corresponden a las estaciones de la Red Sísmica Permanente (RSP) y los triángulos en color amarillo a la Red Sísmica Temporal (RST).
- Figura 3.3.** Señales sísmicas típicas registradas por 8 estaciones de la RSP instaladas en el CVGTV (ver Figura 3.2). En color azul se resaltaron las estaciones TV01, TV11 y TV18 instaladas en la zona central (Zona A). La amplitud de las ondas P y S está representada en nanómetros (nm) y el tiempo en segundos. IP e IS =arribo impulsivo de las ondas P

y S; C y D= polaridad compresiva y dilatacional de la onda P; H= hipocentro en kilómetros.

- Figura 3.4.** Representación gráfica del número de sismos localizados por años y meses. El mayor número de sismos (47) fue registrado en abril de 2012.
- Figura 3.5.** Enjambres sísmicos registrados en la estación TV01 de la RSP instalada en el CVGTV. a) Enjambre 1 de diciembre de 2009. b) Enjambre 2 de diciembre de 2012 ([Anexo 1](#)). Obsérvese la similitud de las formas de onda y espectrogramas. BHZ = estación sísmica de banda ancha, componente vertical (Z); Hz= Hertz.
- Figura 3.6.** Distribución de la sismicidad registrada en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes, correspondiente al periodo 2003-2013. a) Distribución espacial; b) y c) Hipocentros de los sismos proyectados en direcciones oeste-este (O-E) y sur-norte (S-N) respectivamente. Las elipses de color amarillo y rojo representan a los sismos con profundidades superficiales (entre 0.5 y 2.5 km) y profundos (entre 3.5 y 11 km).
- Figura 3.7.** Ubicación de las 4 zonas sísmicas (A, B, C y D) y dirección preferencial del perfil SO-NE para la distribución de los sismos en profundidad. Los círculos en color amarillo son los sismos registrados en el periodo 2003-2013.
- Figura 3.8.** Distribución de los sismos entre los años 2003 y 2010. a) Distribución espacial y b) distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE ([ver Figuras 2.4 y 3.7](#)).
- Figura 3.9.** Distribución de los sismos registrados en el año 2011. a) Distribución espacial y b) distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE ([ver Figura 3.7](#)).
- Figura 3.10.** Distribución de los sismos y enjambres de sismos registrados en el año 2012. a) Distribución espacial y b) distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE ([ver Figura 3.7](#)).
- Figura 3.11.** Distribución de los sismos y enjambres de sismo registrados en el año 2013. a) Distribución espacial y b) distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE ([ver Figura 3.7](#)).
- Figura 3.12.** a) Distribución de la sismicidad y los 13 enjambres identificados entre el 2003 y 2013. b) Distribución en profundidad, proyectado en la dirección preferencial SO-NE ([ver Figura 3.7](#)). Los círculos y números hacen referencia a los enjambres sísmicos. ZT= posible zona de transición frágil-dúctil.
- Figura 3.13.** a) Correlación temporal entre la cantidad de inyección en el pozo LV8 y pruebas de inyección en el pozo LV6 en toneladas por hora (t/h) y el número de sismos localizados por día. El periodo analizado corresponde a los años 2009 y 2013. Los círculos blancos y amarillos son los sismos localizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Servicio Sismológico Nacional (SSN). Los números del 1 al 13 representan a los enjambres identificados. b) Correlación temporal de la inyección y el número de sismos en el campo geotermal de Geysers, California ([Viegas y Hutchings, 2011](#)).
- Figura 3.14.** a) Mecanismos focales obtenidos de 91 sismos, proyectados en el hemisferio focal inferior de igual área. b) Representación porcentual de los tipos de fallamiento según

el código de colores mostrado en la parte superior derecha: FN=falla normal; NS=falla normal con componente Strike-Slip; SS=falla Strike-Slip; FI=falla inversa; IS=falla inversa con componente Strike-Slip y NI=no identificada u oblicua. c y d) Proyección esférica de los ejes de presión (P) y tensión (T). e) Diagrama de rosas de los ejes T. Las flechas indican las direcciones preferenciales del total de mecanismos focales.

**Figura 3.15.** a) Mecanismos focales de los enjambres 1, 8, 9, 10 (círculos discontinuos) y de los sistemas de fallas La Virgen, Mezquital y Cimarrón (rectángulos discontinuos) seleccionados para la inversión del tensor de esfuerzo.

**Figura 3.16.** a) De izquierda a derecha se presenta la ubicación de los enjambres con sus respectivos mecanismos focales que intervinieron en la inversión del tensor de esfuerzo (derecha), los estereogramas conteniendo los planos nodales con sus respectivos ejes P, B y T (centro) y la solución del tensor de esfuerzo con la orientación de los esfuerzos máximo ( $\sigma_1$ ), intermedio ( $\sigma_2$ ) y mínimo ( $\sigma_3$ ) (izquierda), para: a) El enjambre 1, b) el enjambre 10 y c) los enjambres 8 y 9. La línea amarilla resalta la posible continuidad de la falla normal reportada en el mapa geológico-estructural regional del [Servicio Geológico Mexicano \(SGM, 2007\)](#).

**Figura 3.17.** De izquierda a derecha se presentan los estereogramas conteniendo los planos nodales con sus respectivos ejes P, B y T (izquierda) y la solución del tensor de esfuerzo con la orientación de los esfuerzos máximo ( $\sigma_1$ ), intermedio ( $\sigma_2$ ) y mínimo ( $\sigma_3$ ) (izquierda), para los sistemas de fallas: a) La Virgen, b) El Mezquital y c) El Cimarrón. Otros símbolos como en la [Figura 3.14](#).

**Figura 3.18.** a) Mapa tectónico del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y la orientación del campo de esfuerzos obtenidos de la inversión. La flecha indica la inversión del tensor de esfuerzo obtenido con los mecanismos focales de [Sumy et al. \(2013\)](#) (b). FC = falla conjugada; AG = caldera Aguajito; RE = caldera La Reforma; RSP = Red Sísmica Permanente.

**Figura 3.19.** Ley de dependencia frecuencial estimada con el total de sismos registrados el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV).

**Figura 3.20.** Rango de valores de  $Q_c$  y ajuste de la ley de dependencia frecuencial para las 4 zonas sísmicas. Obsérvese que el valor más bajo de  $Q_0$  y más alto de  $\eta$  corresponden a la Zona D (Bonfil-Mezquital).

**Figura 3.21.** a) Ubicación de las estaciones sísmicas seleccionadas para la estimación de  $Q_c$  y sus correspondientes leyes de atenuación. b) Distribución de los valores promedio de  $Q_c$  y su variación con respecto a la frecuencia. Obsérvese que las estaciones TV11 y TV18 presentan valores anómalos a las frecuencias de 2 y 4 Hz respectivamente. c) Ajuste de la ley de dependencia frecuencial para cada una de las estaciones sísmicas.

**Figura 3.22.** Mapa de iso-valores de  $Q_c$  a la frecuencia  $f$  de 2 Hz (a), 4 Hz (b), 8 Hz (c) y 16 (Hz), sobrepuestas al mapa tectónico. Los valores *bajos* de  $Q_c$  o anomalías de *alta* atenuación están representadas por el color rojo; mientras que los valores *altos* de  $Q_c$  o *baja* atenuación están en color azul. RSP= Red Sísmica Permanente.

**Figura 3.22.** Continuación...

- Figura 3.23.** Ejemplos de la estimación de los parámetros de fuente en la componente vertical de la estación sísmica TV05. En la parte inferior de ambas figuras se muestran las señales sísmicas. En la parte superior y en color azul el espectro de desplazamiento de las ondas S, en color plomo el espectro del ruido y en color rojo la estimación de la frecuencia esquina.  $f$  = frecuencia en Hertz,  $M_w$  = magnitud de momento. TV05 es la estación sísmica. B= banda ancha, Z= componente vertical.
- Figura 3.24.** Evolución temporal de los parámetros de fuente de 294 sismos. Los recuadros en color verde muestran los periodos de incrementos de estos parámetros.  $M_0$ =momento sísmico en Newtons-metro (N-m);  $M_w$ =magnitud de momento en grados;  $\Delta\sigma$ =caída de esfuerzo en Megapascals (MPa) y  $R$ =radio de fractura en metros (m).
- Figura 3.25.** Correlación de parámetros de fuente de 294 sismos registrados en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes. a) Momento sísmico ( $M_0$ ) versus frecuencia esquina ( $F_0$ ); 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 de acuerdo al 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  $M_0$  y  $R$ . Las flechas en color azul muestran incrementos de la  $\Delta\sigma$  con la magnitud y profundidad de los hipocentros.
- Figura 3.26.** Correlación del momento sísmico y radio de fractura por zonas. a) Zona A, zona central de campo geotérmico; b) Zona B, caldera El Aguajito; c) Zona C, extremo sur del volcán La Virgen y la falla La Virgen; d) Zona D, entre los sistemas de fallas Bonfil y Mezquital.
- Figura 3.27.** a) Ubicación de los enjambres sísmicos en profundidad. Correlación del momento sísmico y radio de fractura de los enjambres registrados en: b) la Zona A y (b) las Zonas B, C y D. La correlación de la caída de esfuerzo con profundidad son presentados también para: d) la zona A (zona central) y e) las Zonas B, C y D (zonas periféricas de la zona A). Las elipses y círculos en colores magenta (Zona A) y azul claro (B, C y D), representan los incrementos del momento sísmico con la profundidad.
- Figura 3.28.** a) Distribución de la sismicidad localizada en el CVGTV. a) Distribución espacial y b) en profundidad, siguiendo la dirección preferencial SO-NE del perfil estratigráfico de [Benton et al. \(2011\)](#). AG= Caldera El Aguajito; RE= Caldera La Reforma.
- Figura 3.29.** a) Número acumulado de sismos con magnitudes  $M_c$  entre 0.1 y 3.2 como una función del tiempo en años (periodo 2009 y 2013) registrados en el CVGTV. b) Histograma del número de sismos versus la magnitud de coda. c) Estimación del *valor b* promedio para el total de sismos (1275). La línea roja continua muestra el ajuste del acumulado de sismos versus la magnitud. Los triángulos representan la relación frecuencia de sismos no acumulado y la magnitud.
- Figura 3.30.** Estimación del *valor b* promedio para cada una de las zonas sísmicas. Obsérvese que los valores *b* anómalos corresponden a las zonas A y C ([ver Figura 3.29](#)).
- Figura 3.31.** Perfil estratigráfico en dirección SO-NE ([modificado de Benton et al., 2011](#)) y distribución de la sismicidad en el CVGTV donde se muestra la estimación de los

valores  $b$ ,  $a$  y  $Mco$  para 4 profundidades (Prof.). Los círculos y elipses muestran la ubicación de los enjambres identificados entre el periodo 2003-2013 (Otros símbolos ver Figuras 3.12 y 3.29).

**Figura 3.32.** a) Tomografía pseudo 3D del *valor b* del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y mapas de distribución del *valor b* realizadas a profundidades de 1.04, 5.3 y 7.7 km. b) Mapa tectónico del CVGTV y distribución del *valor b* a la profundidad de 5.3 km. c) Relaciones frecuencia-magnitud obtenidas para los círculos con centros ubicados en el volcán La Virgen (azul) y zona sur del sistema de fallas La Virgen (rojo), con sus respectivos valores  $b$ , nivel de sismicidad ( $a$ ) y magnitud de completitud ( $Mco$ ).

**Figura 3.33.** a) Mapa de la distribución del *valor b* a la profundidad de 5.3 km y direcciones de los perfiles en SO-NE y NO-SE. b) Distribución del *valor b*, siguiendo la dirección SO-NE, paralelo al Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) y c) siguiendo la tendencia general de los principales sistemas de fallas: La Virgen (SFV), El Azufre-La Reforma (SFA-SFR). 1, 1a, 1b, 1c, 2 y 3 representan a las anomalías de *valor b*.

**Figura 3.34.** a) Mapa de la distribución del *valor b* a la profundidad de 5.3 km y localización del perfil estratigráfico en dirección SO-NE de Benton et al. (2011). b) Distribución del *valor b*, obtenido de la tomografía pseudo 3D. Los números indican las anomalías de *valor b*. 1, 1b, 1c, 2 y 3 representan las anomalías del *valor b*. Las flechas en color amarillo muestran la ubicación de los sistemas de fallas mencionados.

**Figura 3.35.** Variación temporal del *valor b* y su correlación con la cantidad de inyección y pruebas de inyección de los pozos LV8 y LV6. Las flechas verticales indican periodos de incremento de inyección y las flechas horizontales la disminución del *valor b*. La línea discontinua de color plomo separa los valores  $b \leq 1$  asociados a procesos tectónicos y  $b > 1$  asociados a zonas volcánicas y geotérmicas.

**Figura 4.1.** a) Mapa aeromagnético de anomalías de intensidad de campo total del estado de Baja California Sur. b) Mapa de terrenos tectonoestratigráficos y ubicación del arco y antearco Alisitos (Moore, 1983; Sedlock et al., 1993; Centeno-García et al., 2008, 2011). El cuadro en color rojo representa la ubicación del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGT); las líneas punteadas en color rojo separan los terrenos tectono-estratigráficos, el polígono en color rojo la ubicación del arco y/o antearco Alisitos; 1 y 2 son los dominios magnéticos altos y bajos respectivamente.

**Figura 4.2.** Mapa aeromagnético de anomalías de intensidad de campo total local sobrepuesta a las estructuras geológicas y tectónicas del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGT). La elipse muestra la ubicación del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV). LV= volcán La Virgen; AZ= volcán El Azufre; VI= volcán El Viejo.

**Figura 4.3.** a) Mapa de la primera derivada donde se resalta los dominios magnéticos 1, 2 y 3. b) Mapa geológico y tectónico del Estado de Baja California Sur. Las líneas discontinuas en color negro resaltan el dominio magnético 2 que corresponde al cinturón continental que se extiende en dirección NO-SE. LV= volcán La Virgen.

**Figura 4.4.** a) Mapa regional de la segunda derivada donde se muestra, con mayor detalle, los 3 dominios magnéticos y los subdominios 2A, 2B y 2C. Las anomalías magnéticas

muestran la probable continuidad de las fallas transformantes provenientes del Golfo de California (líneas discontinuas en color blanco). b) Ampliación de las anomalías magnéticas y la tectónica local (líneas en color negro) en la ubicación del CVGTV. Las líneas discontinuas en color negro y amarillo representan los lineamientos inferidos y la delimitación de la depresión SO-NE respectivamente. AG = Caldera El Aguajito; RE = Caldera La Reforma.

**Figura 4.5.** Mapas regionales de gradientes de 10° (a) y 20° (b). En ambas figuras, las anomalías magnéticas muestran la posible continuidad de las fallas transformantes del Golfo de California.

**Figura 4.6.** Mapas regionales de gradientes con orientaciones de: a) 50° y b) 70° El realce de las anomalías magnéticas permiten identificar lineamientos con dirección O-E (líneas discontinuas en color negro), a lo largo del cinturón continental y en la zona del complejo ofiolítico de Puerto Nuevo (c) (Moore, 1983). Los cuadros en colores rojo y negro muestran las ubicaciones del CVGTV y el complejo ofiolítico de Puerto Nuevo. LV= volcán La Virgen.

**Figura 4.7.** Ampliación de los mapas de gradientes con orientaciones de 20° (a) y 70° (b) correspondientes al CVGTV. Las anomalías magnéticas de campo total se correlacionan con los sistemas de fallas regionales NO-SE y locales NE-SO (a) y O-E (b). La elipse en color blanco muestra la ubicación del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes. LV= volcán La Virgen.

**Figura 4.8.** a) Representación tridimensional regional de la profundidad al basamento magnético. b) Ampliación del CVGTV, con la distribución del basamento magnético a nivel local. Las líneas discontinuas en color blanco y magenta representan la prolongación de las fallas provenientes del Golfo de California y la delimitación de la depresión tectónica en dirección SO-NE.

**Figura 4.9.** a) Mapa aeromagnético de campo total y trazo del perfil aeromagnético (A-A') para el modelado bidimensional de los cuerpos magnéticos. b) Ajuste del perfil aeromagnético. c) Interpretación del modelado y representación de los cuerpos magnéticos en profundidad. Las flechas amarillas muestran la correlación de los cuerpos tabulares (¿diques?) identificados en el CVGTV y su representación en superficie (círculos en color negro, Figura 4.9a); las cruces en color azul representan a la sismicidad registrada entre el 2003 y 2013.

**Figura 5.1.** Ubicación de los sondeos magnetotéluricos alrededor del CVGTV. AG= caldera El Aguajito, RE= caldera La Reforma, 1= La Virgen, 2= El Azufre, 3= El Viejo.

**Figura 5.2.** Ubicación de los sondeos MT y tipos de curvas de resistividad y fase identificadas en el CVGTV (Figura 5.1); yx y xy son las curvas de resistividad aparentes que corresponden al campo eléctrico en la dirección magnética NS y EW respectivamente.

**Figura 5.3.** a) Ubicación referencial de los sondeos MT y estimación de la dimensionalidad y direccionalidad de la estructura utilizando el método de descomposición del tensor de impedancias propuestos por McNeice y Jones (2001), para rangos de periodos (T) entre: b) T entre 0.107 y 0.853 s; c) T entre 1.024 y 8.533 s; d) T entre 1.024 y 341.333 s. Los diagramas de rosas representan la dirección preferencial del *strike* regional de

la estructura geoelectrica. 1= La Virgen; 2= El Azufre; 3= El Viejo; AG= caldera El Aguajito y RE= caldera La Reforma.

**Figura 5.4.** a) Ubicación referencial de los sondeos MT y estimación de la dimensionalidad y direccionalidad de la estructura utilizando el método de tensor de fase propuesto por Caldwell et al. (2004), para periodos (T) de: b) T=1.024 s; c) T=11.3122 s y d) T=68.4932 s. Los diagramas de rosas representan la direcciones preferenciales del *strike* regional calculado a partir del azimut del eje máximo principal de las elipses ( $\alpha$ - $\beta$ ).

**Figura 5.5.** a) Ubicación referencial de los sondeos MT y estimación de la dimensionalidad y direccionalidad de la estructura utilizando el método de vectores de inducción siguiendo la convención de Wiese (1962), para periodos (T) de: b) T = 1.024 s; c) T = 11.3122 s y d) T=68.4932 s. Las flechas discontinuas en color amarillo y verde, representan la rotación de los vectores de inducción y apuntan fuera de la zona conductora.

**Figura 5.6.** Malla de 58 x 68 x 33 celdas en direcciones: a) horizontales x (E-O), y (N-S) y b) vertical z (km) o profundidad.

**Figura 5.7.** Comparación de las curvas de convergencia para los Modelos I (a) y II (b). El menor desajuste (RMS) de 2.12 y 1.62 convergen en la iteración 4. Las líneas discontinuas de color azul representan la convergencia de los modelos y la línea discontinua de color rojo representa el límite del mejor ajuste establecido por el algoritmo de inversión.

**Figura 5.8.** Modelos I y II: ejemplos comparativos del ajuste de los datos magnetotelúricos observados y los predichos (círculos celestes y verdes) de la inversión 3D para los sondeos TV12, TV19 y TV47. La resistividad aparente ( $\Omega m$ ) y el ángulo de fase ( $^{\circ}$ ) derivadas del tensor de impedancia magneotelúrica están representados por los colores verde (xx), celeste (yy), rojo (xy) y azul (yx) respectivamente.

**Figura 5.9.** Mapas de distribución de la resistividad en profundidad de los Modelos I (lado izquierdo) y II (lado derecho) para las profundidades de: a) 0.05 km; b) 0.5 km; c) 1.0 km; d) 4.4 km; e) 5.3 km y f) 7.7 km. R1 y R2 son las zonas resistivas; C1, C2 y C3 representan las zonas conductivas. Obsérvese en el mapa (b), la zona conductiva C1 está limitada por los sistemas de fallas El Aguajito, El Álamo, El Mezquital, La Virgen y La Reforma-El Azufre (resaltados en color magenta).

**Figura 5.9.** Continuación 1...

**Figura 5.9.** Continuación 2.

**Figura 5.10.** Codificación de los principales sistemas de fallas regionales y locales del CVGTV para su correlación con la distribución de la resistividad en profundidad.

**Figura 5.11.** a) Mapa tectónico del CVGTV y ubicación de los perfiles en dirección O-E. b) Distribución de la resistividad en los perfiles O-E obtenidos del Modelo I y c) perfiles obtenidos del Modelo II.

**Figura 5.12.** Perfiles de la distribución de la resistividad en dirección S-N. a) Mapa tectónico del CVGTV y perfiles en dirección S-N. b) Perfiles obtenidos del Modelo I. c) Perfiles obtenidos del Modelo II.

- Figura 5.13.** a) Mapa tectónico del CVGTV y orientación SO-NE de perfil A-A'. Distribución de la resistividad obtenida con: b) la inversión 2D de [Romo et al. \(2005\)](#); c y d) obtenidas con la inversión 3D, Modelos I (c) y II (d). La línea discontinua en color blanco representa el límite de resolución (RTM) de la inversión 3D. R1 y R2 representan a las zonas resistivas y C1 a la zona conductiva superficial. ¿Co? es la anomalía conductiva identificada por [Romo et al. \(2005\)](#).
- Figura 5.14.** a) Mapa tectónico del CVGTV y orientación SO-NE del perfil B-B'. Distribución de la resistividad obtenida con: b) la inversión 2D de [Romo et al. \(2005\)](#); c y d) obtenidas con la inversión 3D, Modelos I (c) y II (d). La línea discontinua en color blanco representa el límite de resolución (RTM) de la inversión 3D. R1 y R2 representan a las zonas resistivas y C1 a la zona conductiva superficial. ¿Co1? es las anomalía conductiva profunda identificada por [Romo et al. \(2005\)](#).
- Figura 5.15.** a) Mapa tectónico del CVGTV y dirección SO-NE del perfil estratigráfico de [Benton et al. \(2011\)](#) donde se sobrepusieron las distribuciones de resistividades obtenidas con la inversión magnetotelúrica 3D. b) Modelo I y c) Modelo II. Los polígonos discontinuos en color rojo resaltan los límites de las zonas conductoras **C1** y **¿C3?**, la línea discontinua en color blanco el límite de resolución de la inversión magnetotelúrica 3D (RMT), las líneas continuas en color amarillo representan a los sistemas de fallas. SFM = sistema de fallas El Mezquital; SFV = sistema de fallas La Virgen; SFR-SFA = sistema de fallas La Reforma-El Azufre. LV6, LV4/4D son los pozos productores y LV8 el pozo inyector. **R1** y **R2** las zonas resistivas. SR= secuencias volcánicas Santa Rosalia, SL = Formación Santa Lucía y Co = Formación Comondú.
- Figura 5.16.** Evaluación del ajuste del modelo de inversión 3D (RMS) con relación a la profundidad y las resistividades máximas de 100 y 1000  $\Omega$ m.
- Figura 5.17.** Ejemplos del ajuste del modelo de inversión (Modelo II) (líneas continuas) y el editado (líneas discontinuas) para los sondeos TV05, TV06, TV37\_a y TV63. En el centro, se muestra el mapa de resistividad a la profundidad de 6.4 km, la ubicación espacial de los sondeos y la anomalía conductiva **¿C3?**.
- Figura 5.18.** Mapas de distribución de resistividad para las profundidades de: a) 3 km, b) 5.3 km y c) 11.3 km, donde fue removida la anomalía conductiva **¿C3?**.
- Figura 5.19.** Distribución de la resistividad y la sismicidad en profundidad. Los perfiles corresponden a la zona volcánica de Taupo (TVZ) en Nueva Zelanda ([Heise et al., 2007](#)), b) al campo geotermal de Coso en Estados Unidos ([Newman et al., 2008](#)) y c) al sistema geotermal Kamojang en Indonesia ([Baru-Raharjo, 2012](#)).
- Figura 5.20.** Correlación de la distribución de la resistividad y la sismicidad del periodo 2003-2013 (círculos blancos). a) Mapa del CVGTV, ubicación de los sondeos MT y los perfiles en dirección O-E (A5, A6) b) Perfiles A5 y A6 utilizando el modelo de resistividad I y c) Perfiles A5 y A6 utilizando el modelo de resistividad II. Las líneas discontinuas en color magenta remarcen las discontinuidades de resistividad, probablemente asociadas a las fallas F4, F7, F8, F9 y F11 ([ver Tabla 5.2](#)). Las líneas discontinuas de color blanco representan a la profundidad máxima de buena resolución de la inversión magnetotelúrica 3D (RMT).

- Figura 5.21.** Distribución de la resistividad y la sismicidad en los perfiles b) A-A' y c) B-B', según las orientaciones SO-NE presentadas en el mapa tectónico (a). En el lado izquierdo se presenta los perfiles de resistividad de Romo et al. (2005), en el centro y lado izquierdo, los perfiles de resistividad elaborados con los Modelos I y II respectivamente. La línea discontinua en color blanco representa el límite de resolución (RTM) de la inversión 3D. R1 y R2 representan a las zonas resistivas y C1 a la zona conductiva superficial. ¿Co? es la anomalía conductiva identificada por Romo et al. (2005).
- Figura 5.22.** a) Mapa tectónico del CVGTV y dirección SO-NE del perfil estratigráfico de Benton et al. (2011) donde se realizó la correlación de la distribución de la resistividad y la sismicidad correspondiente al periodo 2003-2013 (círculos blancos. b) Modelo I y c) Modelo II. Las líneas discontinuas en colores blanco y amarillo representan el límite de resolución del modelo de inversión 3D (RMT), la delineación de la zona de transición (ZT) respectivamente. Los números y la línea discontinua en color anaranjado representan las ubicaciones de las anomalías de *valor b*, identificadas en la pseudo tomografía 3D (Figuras 3.33 y 3.34).
- Figura 6.1.** a) Mapa tectónico del CVGV donde se muestra la dirección SO-NE del perfil estratigráfico de Benton et al. (2011). b) Integración de los estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos en el perfil estratigráfico de Benton et al. (2011). R1 y R2 representan a las zonas resistivas; C1, ¿C2? y ¿C3?, representan a las zonas conductivas; los círculos blancos son los hipocentros de los sismos (periodo 2003-2013); la línea discontinua en color amarillo delinea la posible zona de transición frágil-dúctil (ZT); La flecha blanca representa el posible ingreso de agua de mar (Verma et al., 2006) a través de los sistemas de fallas del Golfo de California, en particular, de la Cuenca de Guaymas (Morandi et al., 2002); las flechas en color rojo indica el posible camino del flujo de calor que alimentaría al campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.

## LISTA DE TABLAS

- Tabla 3.1.** Ubicación geográfica de las estaciones sísmicas instaladas en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes, entre los años 2003 y 2013. Lat. y Lon. = latitud y longitud en grados decimales; Alt.= altitud en metros sobre el nivel de mar; AC= acelerógrafo; BB = sismógrafo de banda ancha; SN= sin nombre.
- Tabla 3.2.** Modelo de velocidad ([modificado por Rodríguez, 2000](#)) utilizado en el procesamiento de datos sísmicos, periodo 2003-2013.  $V_p$ = velocidad de la onda P en kilómetros por segundo (km/s); prof.= profundidad en kilómetros (km).
- Tabla 3.3.** Resultados de la inversión del tensor de esfuerzo para los enjambres sísmicos y fallas.  $N^{\circ}mf$ = número de mecanismos focales;  $N^{\circ}pn$ =número de planos nodales;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  son los ejes de esfuerzos;  $pl=plunge$ ;  $az$ = azimut;  $Q$ = calidad;  $\alpha$ = ángulo de ajuste promedio;  $R'$ = régimen de esfuerzo numérico; Aver.= promedio; FN= falla normal; NS= falla normal con componente Strike-Slip; SS= falla *Strike-Slip*; NI= falla no identificada u oblicua.
- Tabla 3.4.** Rango de valores de  $Q_c$  obtenidos para todo el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y las 4 zonas sísmicas;  $f$  es la frecuencia central en Hertz (Hz).
- Tabla 3.5.** Rango de valores del factor de calidad  $Q_c$  a la frecuencia de 1 Hz y el coeficiente de anelasticidad  $\eta$  obtenidos en este estudio y otras zonas volcánicas y geotérmicas.
- Tabla 3.6.** Leyes de atenuación obtenidas para todo el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) y las zonas sísmicas A (centro), B (Aguajito), C (sur de la falla La Virgen y D (entre fallas Bonfil-Mezquital).
- Tabla 3.7.** Leyes de atenuación obtenidas para 6 estaciones sísmicas instaladas en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV).
- Tabla 3.8.** Correlación de los parámetros de fuente obtenidos en este estudio y por otros autores en zonas volcánicas, geotérmicas y mineras.
- Tabla 3.9.** Valor  $b$  y su respectiva desviación estándar, la constante  $a$  y la magnitud de completitud  $M_{co}$  estimadas para todo el CVGTV y las zonas A, B, C y D.
- Tabla 3.10.** Estimación del valor  $b$ , la constante  $a$  y la magnitud de completitud ( $M_{co}$ ) por profundidad.
- Tabla 3.11.** Resumen de los resultados obtenidos del estudio sismológico del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV), durante el periodo 2003-2013.  $\Delta\sigma$  es la caída de esfuerzo en MPa.
- Tabla 5.1** Distribución de resistividad en profundidad, correspondiente a los Modelos I y II e identificación de zonas resistivas y conductivas.
- Tabla 5.2.** Códigos y nombres abreviados de los principales sistemas de fallas que cruzan los perfiles magnetotelúricos O-E y N-S representados en las [Figuras 5.11 y 5.12](#). SN= sin nombre.

**Tabla 6.1.** Resumen de la caracterización del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (CVGTV) correlacionando los estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos previos y los obtenidos en este estudio. Prof.= profundidad en kilómetros;  $\Omega$ m (Ohm-metro). R1 y R2 representan a las zonas resistivas; C1, ¿C2? y ¿C3? representan a las zonas conductivas anómalas. Los signos de interrogación hacen referencia a la incertidumbre de la presencia o no de dichas zonas conductivas.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Parámetros hipocentrales de los 575 sismos registrados en el Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes, periodo 2003-2013. N°= número correlativo de los sismos; la fecha en años (AA), mes (MM) y día (DD); el tiempo origen en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); latitud y longitud en grados (°); la profundidad en kilómetros (km); N° Est.= número de estaciones utilizadas en la localización; RMS= raíz media cuadrática y Mc= magnitud de coda; N° Enj.= número de enjambre; CFE= sismos localizados por el personal de la Comisión Federal de Electricidad; SSN= sismos regionales localizados y publicados por el Servicio Sismológico Nacional.

N°	Fecha AA/MM/DD	Tiempo Origen HH:MM:SS	Latitud (°)	Longitud (°)	Prof. (km)	N° Est.	RMS	Mc	N° Enj.
1	2003/09/20	05:25:10.126	27.52456	-112.54201	4.442	4	0.034	1.0	
2	2003/09/20	22:47:51.829	27.52001	-112.54765	4.751	5	0.018	0.9	
3	2003/10/18	11:53:26.950	27.51037	-112.58359	5.242	4	0.088	0.8	
4	2003/10/18	11:53:45.179	27.51247	-112.58385	5.098	4	0.074	0.4	
5	2003/10/24	06:15:39.899	27.52444	-112.56297	2.485	5	0.062	1.1	
6	2003/10/25	23:18:37.604	27.52915	-112.53309	2.662	7	0.054	1.2	
7	2003/11/02	23:20:26.412	27.52409	-112.57797	5.406	6	0.055	1.3	
8	2003/11/05	17:35:52.316	27.47357	-112.60804	5.165	7	0.034	1.6	
9	2003/11/05	18:51:01.503	27.53269	-112.57639	3.822	8	0.040	1.9	
10	2003/11/17	13:44:22.127	27.41969	-112.48367	6.615	5	0.041	1.7	
11	2003/11/19	20:22:51.400	27.40710	-112.47282	6.533	6	0.024	1.4	
12	2004/10/31	04:26:42.166	27.58408	-112.53445	6.777	5	0.019	1.7	
13	2004/11/01	20:48:36.305	27.52016	-112.54964	4.524	4	0.030	1.7	
14	2006/05/30	20:47:35.026	27.44792	-112.56640	2.000	4	0.139	1.4	
15	2006/05/30	20:48:54.961	27.50857	-112.55801	4.010	4	0.036	1.4	
16	2006/05/31	18:17:29.315	27.46266	-112.59660	6.272	6	0.036	1.7	
17	2006/06/13	10:20:19.711	27.51664	-112.54027	5.964	4	0.038	1.7	
18	2006/06/13	10:53:48.358	27.51505	-112.53522	5.863	4	0.039	1.7	
19	2009/06/02	14:35:40.307	27.49286	-112.59063	4.857	4	0.018	1.2	
20	2009/12/19	17:18:49.977	27.50167	-112.57300	0.519	4	0.031	1.3	1
21	2009/12/19	21:35:53.618	27.49969	-112.57255	1.477	4	0.034	1.8	1
22	2009/12/25	12:33:10.177	27.50073	-112.57243	2.612	4	0.037	2.1	1
23	2009/12/25	12:56:06.393	27.50113	-112.57253	1.234	4	0.030	1.2	1
24	2009/12/25	12:56:23.547	27.50060	-112.57200	1.483	4	0.033	1.9	1
25	2009/12/25	16:10:58.959	27.49475	-112.57507	0.503	4	0.013	1.3	1
26	2009/12/25	16:34:16.904	27.49783	-112.57183	2.000	4	0.018	1.3	1
27	2009/12/26	01:37:05.851	27.50004	-112.57352	2.000	4	0.040	1.2	1
28	2010/01/23	17:42:29.915	27.51407	-112.55209	3.466	4	0.026	1.8	1
29	2010/01/30	07:39:12.732	27.50725	-112.57406	4.906	4	0.050	1.3	1
30	2010/01/31	03:35:07.475	27.38751	-112.56906	5.405	4	0.013	2.5	
31	2010/01/31	04:18:42.102	27.38599	-112.55572	5.120	4	0.054	2.0	
32	2010/02/08	23:04:37.203	27.50746	-112.55663	3.520	4	0.022	1.4	
33	2010/03/31	14:13:21.685	27.39016	-112.56425	5.379	4	0.042	2.6	
34	2010/04/02	05:12:44.506	27.51486	-112.56040	5.008	4	0.044	1.4	
35	2010/04/12	20:40:56.421	27.49926	-112.58865	5.306	4	0.022	1.2	
36	2010/04/12	20:44:25.328	27.48860	-112.58969	2.000	4	0.059	1.4	
37	2010/04/16	01:17:38.148	27.45558	-112.62070	6.855	4	0.032	2.3	
38	2010/04/20	09:28:18.722	27.53863	-112.57213	6.008	4	0.015	1.8	
39	2010/04/20	13:53:36.107	27.53167	-112.58685	5.695	4	0.043	2.0	

40	2010/04/21	14:12:31.939	27.51806	-112.57021	4.133	4	0.040	1.6	
41	2010/04/22	04:26:15.737	27.51947	-112.58723	4.982	4	0.047	1.7	
42	2010/04/25	21:25:06.335	27.59361	-112.55889	6.861	4	0.018	1.8	
43	2010/05/02	10:36:5.593	27.48856	-112.58627	0.715	4	0.046	1.2	
44	2010/05/02	11:44:39.574	27.47735	-112.58922	1.869	4	0.031	1.0	
45	2010/05/02	18:36:37.741	27.47981	-112.58887	0.590	4	0.030	2.2	
46	2010/05/02	18:37:39.124	27.47950	-112.59040	2.000	4	0.027	2.4	
47	2010/05/03	01:55:12.882	27.47639	-112.59138	1.869	4	0.019	1.7	
48	2010/05/03	15:53:49.000	27.49262	-112.58213	2.000	4	0.041	1.3	
49	2010/05/05	20:50:15.227	27.46452	-112.59838	1.514	4	0.040	1.6	
50	2010/05/06	04:44:21.530	27.49290	-112.58196	2.000	4	0.026	1.1	
51	2010/05/06	23:08:15.821	27.51521	-112.58053	4.182	4	0.032	1.5	2
52	2010/05/10	03:15:16.717	27.51279	-112.55930	5.152	5	0.054	1.1	2
53	2010/05/10	03:16:13.906	27.50897	-112.56432	4.417	5	0.038	1.3	2
54	2010/05/10	09:09:25.071	27.50194	-112.58386	6.018	5	0.121	1.1	2
55	2010/05/13	19:38:34.543	27.52011	-112.57916	5.214	5	0.095	0.6	2
56	2010/05/13	19:58:31.746	27.52094	-112.57917	5.110	5	0.073	1.7	2
57	2010/05/14	10:14:59.964	27.52170	-112.57893	5.438	5	0.081	1.4	2
58	2010/05/14	18:52:04.988	27.52016	-112.57928	5.249	5	0.076	1.2	2
59	2010/05/15	03:52:49.113	27.51783	-112.58061	5.459	5	0.096	1.2	2
60	2010/05/15	05:11:18.301	27.51357	-112.56162	5.549	5	0.058	0.7	2
61	2010/05/15	06:59:39.675	27.51838	-112.57993	5.115	5	0.092	1.1	2
62	2010/05/16	07:45:02.681	27.51628	-112.58217	5.433	5	0.094	1.3	2
63	2010/05/18	14:25:28.521	27.53029	-112.57574	1.145	5	0.051	1.6	2
64	2010/06/04	23:36:03.899	27.51351	-112.58440	5.467	5	0.084	1.1	
65	2010/06/06	15:15:53.243	27.51420	-112.58472	5.984	5	0.074	1.6	
66	2010/06/07	20:36:29.507	27.43008	-112.55898	6.267	4	0.052	1.6	
67	2010/06/08	18:01:21.427	27.51347	-112.58434	5.435	5	0.085	0.9	
68	2010/06/08	18:30:09.932	27.51513	-112.58911	5.005	4	0.028	1.3	
69	2010/06/12	01:23:19.033	27.51329	-112.55969	5.550	5	0.056	2.0	
70	2010/06/14	01:46:19.164	27.49570	-112.60377	4.404	5	0.049	1.6	
71	2010/06/15	11:17:21.835	27.52286	-112.54774	4.644	4	0.051	1.2	
72	2010/06/15	11:21:36.713	27.53232	-112.54436	6.044	5	0.135	1.7	
73	2010/06/16	18:07:07.508	27.40519	-112.36980	2.425	5	0.059	2.5	
74	2010/06/22	04:16:40.778	27.50405	-112.54795	4.681	4	0.063	1.1	
75	2010/06/22	09:27:39.355	27.42003	-112.51562	6.461	5	0.041	2.1	
76	2010/06/24	06:33:41.286	27.51259	-112.63051	5.341	6	0.073	1.7	
77	2010/06/24	17:41:25.224	27.50884	-112.57819	5.281	5	0.103	1.9	
78	2010/06/26	14:20:33.057	27.58464	-112.54288	6.413	5	0.077	2.6	
79	2010/06/26	16:50:26.727	27.58446	-112.53932	6.629	5	0.064	1.5	
80	2010/06/26	17:38:45.355	27.60101	-112.54372	6.891	6	0.085	2.3	
81	2010/06/27	09:44:13.557	27.60042	-112.52943	5.614	5	0.054	2.6	
82	2010/06/28	01:53:51.594	27.59718	-112.54545	6.728	5	0.025	2.0	
83	2010/06/30	15:45:56.341	27.42166	-112.55538	6.800	5	0.091	1.7	
84	2010/07/06	11:53:35.121	27.41184	-112.52420	6.486	5	0.077	1.9	
85	2010/07/10	23:36:16.678	27.62034	-112.54491	10.942	6	0.045	2.4	
86	2010/07/11	16:26:48.374	27.43387	-112.55837	5.334	4	0.012	1.1	
87	2010/07/14	16:11:57.651	27.47199	-112.59544	2.000	5	0.034	2.0	
88	2010/07/14	17:36:34.912	27.48315	-112.58932	3.642	4	0.017	1.2	
89	2010/07/16	23:08:47.034	27.47021	-112.59553	1.502	4	0.013	2.0	
90	2010/07/19	15:57:58.780	27.51332	-112.58145	4.664	4	0.032	1.6	
91	2010/07/20	22:16:49.092	27.51270	-112.62759	4.598	5	0.040	1.8	
92	2010/07/22	06:08:36.283	27.41841	-112.54803	6.139	5	0.082	1.5	
93	2010/07/26	11:47:06.738	27.47432	-112.59679	2.000	4	0.035	2.4	
94	2010/07/28	12:31:46.182	27.41550	-112.54585	6.005	4	0.046	2.0	
95	2010/08/07	13:37:08.906	27.39034	-112.53896	6.585	4	0.061	1.7	
96	2010/08/09	23:18:11.248	27.47095	-112.59499	2.000	5	0.064	2.1	
CFE-1	2010/08/13	14:21:047.6	27.53100	-112.55700	2.8			2.7	

CFE-2	2010/08/13	14:27:45.5	27.53400	-112.55800	3.0			3.5
97	2010/08/13	14:27:45.681	27.52381	-112.57070	2.379	4	0.021	2.7
98	2010/08/16	08:52:48.884	27.47836	-112.59304	2.100	4	0.091	1.6
99	2010/08/16	15:25:29.420	27.47390	-112.59712	0.560	4	0.041	2.4
100	2010/10/08	07:47:27.230	27.61633	-112.61607	5.834	4	0.011	2.4
101	2010/10/22	09:34:18.084	27.51658	-112.58087	5.415	5	0.091	2.4
102	2010/10/22	11:20:16.559	27.51944	-112.58166	5.020	4	0.037	1.8
103	2010/10/27	01:55:32.640	27.47808	-112.59275	4.487	5	0.048	1.0
104	2010/10/27	02:33:02.881	27.56911	-112.58653	6.736	5	0.047	2.8
105	2010/10/27	16:26:25.910	27.49240	-112.58326	4.917	4	0.044	2.5
106	2010/10/30	03:52:14.744	27.54186	-112.57104	2.724	4	0.016	2.3
107	2010/11/05	07:20:42.114	27.48444	-112.59724	5.016	4	0.046	1.9
SSN-1	2010/11/05	16:48:59	27.27000	-112.37000	5.0			3.4
SSN-2	2010/11/06	01:51:52	27.49000	-112.53000	5.0			3.1
SSN-3	2010/11/11	10:24:16	27.66000	-112.31000	18.0			4.0
108	2010/11/14	23:40:54.230	27.49181	-112.56445	4.996	4	0.071	2.1
109	2010/11/16	05:11:06.758	27.48815	-112.54328	4.907	5	0.133	2.6
110	2010/11/16	07:49:22.778	27.40060	-112.54732	6.477	5	0.046	2.3
111	2010/11/20	00:55:00.522	27.52472	-112.56016	5.761	4	0.027	2.0
112	2010/12/03	09:09:14.671	27.38245	-112.50090	5.800	5	0.059	2.5
113	2010/12/05	01:49:45.362	27.51312	-112.56424	5.014	5	0.053	2.3
114	2010/12/06	09:42:02.196	27.51645	-112.55026	4.671	4	0.028	2.3
115	2010/12/07	11:13:24.643	27.48012	-112.58923	1.648	5	0.075	1.6
116	2010/12/16	12:01:46.457	27.41078	-112.54327	6.338	5	0.051	2.6
117	2010/12/17	04:42:57.698	27.44693	-112.55101	5.023	5	0.042	2.5
118	2010/12/23	11:20:08.225	27.51266	-112.54679	5.189	5	0.054	2.0
119	2010/12/23	12:32:25.016	27.51187	-112.54836	4.866	4	0.030	2.2
SSN-4	2010/12/26	21:48:19	27.66000	-112.51000	8.0			4.2
SSN-5	2010/12/26	23:58:40	27.62000	-112.48000	12.0			4.5
SSN-6	2010/12/27	05:44:58	27.63000	-112.48000	10.0			3.8
120	2010/12/29	05:55:03.974	27.51340	-112.55949	5.106	4	0.015	1.5
121	2010/12/30	11:55:12.819	27.58756	-112.58233	6.424	5	0.089	1.8
122	2010/12/30	21:55:29.926	27.51895	-112.56086	5.426	4	0.043	2.5
123	2010/12/31	07:46:56.323	27.47830	-112.59039	2.000	5	0.046	2.7
124	2010/12/31	08:04:38.227	27.47607	-112.59146	1.630	5	0.021	2.3
125	2011/01/01	23:06:34.897	27.50533	-112.55353	5.146	4	0.044	2.6
126	2011/01/03	01:20:00.540	27.48254	-112.48301	9.650	5	0.051	2.3
127	2011/01/27	04:20:50.275	27.41908	-112.53452	6.658	5	0.034	2.2
128	2011/01/30	11:31:53.750	27.47476	-112.59523	1.660	4	0.086	1.3
129	2011/02/07	13:13:00.007	27.40727	-112.56323	6.265	4	0.020	2.1
130	2011/02/08	04:18:55.626	27.37598	-112.56229	6.708	5	0.030	2.6
131	2011/02/09	02:51:24.300	27.42776	-112.56888	5.987	4	0.028	1.8
132	2011/02/23	08:10:49.609	27.39470	-112.50049	5.737	4	0.039	1.8
133	2011/03/01	06:07:54.551	27.43699	-112.55001	5.896	4	0.018	2.1
134	2011/03/01	14:30:06.839	27.42766	-112.54150	6.390	4	0.028	2.2
135	2011/03/03	03:47:48.577	27.38593	-112.52122	5.863	4	0.048	2.4
136	2011/03/05	03:23:03.377	27.51979	-112.56683	5.156	4	0.021	2.3
137	2011/03/06	10:11:05.757	27.50998	-112.56789	4.705	4	0.040	2.2
138	2011/03/13	18:23:13.556	27.52095	-112.56747	5.178	4	0.038	1.7
139	2011/03/24	22:36:59.961	27.47327	-112.61179	6.412	5	0.045	1.7
140	2011/03/25	06:13:29.661	27.33835	-112.57272	3.394	5	0.035	2.1
SSN-7	2011/03/25	08:40:34	27.54000	-112.43000	11.0			3.6
141	2011/03/25	22:57:32.758	27.54386	-112.54596	6.548	7	0.084	2.2
142	2011/03/28	13:56:25.303	27.53520	-112.55341	6.406	5	0.052	1.9
143	2011/03/28	19:05:00.195	27.55255	-112.53921	6.936	5	0.045	1.4
144	2011/03/30	06:41:50.451	27.42596	-112.50237	6.061	5	0.055	1.9
145	2011/03/31	08:35:52.363	27.50126	-112.57261	3.435	6	0.028	1.9
146	2011/03/31	11:59:31.451	27.54279	-112.54559	6.503	6	0.016	1.4

147	2011/03/31	21:45:00.286	27.54213	-112.54310	7.102	5	0.047	1.4	
148	2011/04/01	06:37:28.186	27.41785	-112.50802	6.152	6	0.086	1.7	
149	2011/04/04	09:48:26.144	27.53778	-112.55128	6.502	6	0.076	1.9	
150	2011/04/04	21:46:10.899	27.54575	-112.54366	6.921	6	0.047	2.0	
151	2011/04/05	18:57:46.307	27.54766	-112.54718	5.923	6	0.152	1.9	
152	2011/04/18	14:22:39.831	27.44419	-112.61908	5.500	5	0.076	1.9	
153	2011/04/18	14:45:22.643	27.37766	-112.57140	6.807	5	0.056	1.7	
154	2011/04/23	05:40:57.639	27.39868	-112.52715	6.230	7	0.106	2.4	
155	2011/04/27	01:04:50.750	27.43945	-112.56622	6.747	5	0.030	1.4	
156	2011/04/27	01:14:50.605	27.42917	-112.55708	6.687	6	0.077	1.5	
157	2011/04/29	09:35:10.038	27.48115	-112.58334	0.578	4	0.039	2.8	
158	2011/05/04	01:08:04.836	27.36597	-112.50147	5.045	6	0.129	2.6	
159	2011/05/10	03:03:30.652	27.49821	-112.60847	4.293	6	0.062	1.7	3
160	2011/05/12	14:10:59.587	27.50890	-112.61465	4.843	5	0.080	1.1	3
161	2011/05/12	14:16:41.536	27.49947	-112.59595	2.000	4	0.093	1.0	3
162	2011/05/12	20:17:30.205	27.50891	-112.61739	5.762	5	0.044	1.5	3
163	2011/05/12	20:55:53.356	27.51355	-112.58982	4.603	4	0.011	0.9	3
164	2011/05/19	17:45:43.002	27.40712	-112.50902	6.582	6	0.057	2.2	
165	2011/05/20	04:57:06.571	27.50064	-112.56747	2.000	5	0.193	1.8	
166	2011/05/23	05:42:28.152	27.41749	-112.63734	6.362	5	0.037	2.0	
167	2011/05/27	03:25:54.738	27.47925	-112.59033	1.690	4	0.081	0.7	3
168	2011/06/03	22:23:34.639	27.51548	-112.56654	5.152	5	0.026	1.4	
169	2011/06/07	18:49:55.629	27.51800	-112.55896	5.460	4	0.049	1.5	
170	2011/06/08	20:07:43.168	27.47985	-112.59013	2.000	6	0.063	2.0	
171	2011/06/30	09:24:40.102	27.49430	-112.58094	2.000	4	0.022	1.8	
172	2011/06/30	09:24:40.1	27.49400	-112.58100	2.100	4	0.020	1.8	
SSN-8	2011/06/30	16:34:33	27.43000	-112.61000	16.0			3.6	
173	2011/07/01	17:46:22.528	27.40167	-112.54577	6.397	6	0.073	2.1	
174	2011/07/03	12:51:07.913	27.52558	-112.56575	3.974	5	0.042	1.9	4
175	2011/07/03	13:09:29.501	27.52661	-112.56680	3.718	5	0.052	1.8	4
176	2011/07/03	13:10:11.323	27.51813	-112.57143	2.749	6	0.027	2.3	4
177	2011/07/04	03:37:52.304	27.51679	-112.56194	4.624	5	0.060	1.4	4
178	2011/07/06	01:27:41.251	27.50433	-112.51569	6.960	5	0.057	1.1	4
179	2011/07/08	03:10:16.541	27.52967	-112.54967	6.841	5	0.034	1.4	4
180	2011/07/08	20:15:59.197	27.53085	-112.55214	7.456	5	0.073	0.8	4
181	2011/07/14	16:38:36.631	27.52622	-112.57254	3.093	4	0.032	1.5	4
182	2011/07/18	21:29:26.541	27.47774	-112.60131	4.183	5	0.076	1.6	
183	2011/07/21	17:02:38.028	27.38184	-112.55089	5.474	6	0.056	2.1	
184	2011/07/26	00:07:28.805	27.51908	-112.56732	4.968	6	0.036	2.4	4
185	2011/07/26	00:18:18.554	27.51710	-112.56316	6.025	5	0.054	1.5	4
186	2011/07/27	04:20:12.622	27.51556	-112.56425	5.416	6	0.016	1.0	4
187	2011/07/29	06:15:37.367	27.59556	-112.56834	9.712	7	0.038	2.1	
188	2011/07/29	06:56:35.782	27.59776	-112.56839	9.781	7	0.039	1.7	
189	2011/07/31	02:36:36.115	27.59943	-112.56915	9.899	7	0.036	1.5	
190	2011/08/01	09:15:03.119	27.48973	-112.59371	3.216	6	0.044	2.1	
191	2011/08/01	09:28:13.588	27.48933	-112.59493	2.906	6	0.065	1.7	
192	2011/08/02	05:44:38.127	27.51444	-112.58228	4.890	6	0.081	1.8	
193	2011/08/02	06:33:03.641	27.52102	-112.58212	4.851	4	0.040	0.7	
194	2011/08/11	14:41:37.844	27.50330	-112.57768	4.908	7	0.074	2.5	
195	2011/08/14	10:30:23.955	27.49867	-112.58890	5.486	8	0.038	2.4	
196	2011/08/14	10:35:39.580	27.50028	-112.59138	4.727	7	0.080	1.6	
197	2011/08/16	16:41:45.639	27.42583	-112.54892	6.620	8	0.052	1.4	
198	2011/08/16	17:14:39.985	27.42967	-112.54939	6.662	7	0.040	1.7	
199	2011/08/16	23:27:48.723	27.42687	-112.55083	6.752	8	0.047	1.4	
200	2011/08/17	06:35:15.145	27.51804	-112.56554	5.372	5	0.036	1.4	
201	2011/08/19	17:58:11.963	27.52236	-112.55534	5.422	5	0.081	0.8	
202	2011/08/20	04:05:07.567	27.47182	-112.55724	6.746	5	0.046	2.4	
203	2011/08/20	21:42:25.809	27.34518	-112.73509	5.311	7	0.049	2.3	

204	2011/08/22	06:50:33.678	27.36469	-112.57542	5.801	5	0.055	1.5	
205	2011/08/24	22:33:09.332	27.49355	-112.59135	5.319	5	0.035	1.8	
206	2011/08/24	22:48 50.296	27.41509	-112.56703	6.522	4	0.046	1.6	
207	2011/08/26	08:29 53.140	27.48283	-112.53675	5.088	7	0.065	2.7	
208	2011/09/04	08:16 31.727	27.51118	-112.58569	4.912	5	0.083	1.4	
209	2011/09/07	01:05 6.504	27.44524	-112.61699	5.382	5	0.078	1.3	
210	2011/09/09	06:20 24.302	27.50359	-112.60897	2.000	5	0.074	1.3	
211	2011/09/09	12:11 22.767	27.57287	-112.55437	6.995	5	0.040	1.0	
212	2011/09/20	04:57 44.080	27.51171	-112.57382	0.772	4	0.234	0.8	
213	2011/09/23	21:08 25.806	27.39307	-112.55259	6.065	5	0.063	1.9	
214	2011/09/24	14:06 12.571	27.46582	-112.60262	2.000	6	0.119	1.1	
215	2011/09/24	18:01 4.456	27.41194	-112.51192	5.864	6	0.053	1.6	
216	2011/09/28	11:26 55.505	27.37936	-112.54882	5.541	6	0.113	2.0	
217	2011/09/29	16:48 49.962	27.43844	-112.54758	6.535	6	0.120	1.6	
218	2011/09/29	19:01 17.208	27.39037	-112.56907	6.502	4	0.045	1.5	
219	2011/09/30	03:56 8.968	27.39641	-112.52699	5.571	5	0.097	1.4	
220	2011/10/01	09:39 15.564	27.40973	-112.51659	6.347	7	0.061	1.9	
221	2011/10/03	00:35 28.668	27.40218	-112.51237	6.115	7	0.083	2.1	
222	2011/10/05	02:20 28.385	27.56694	-112.52359	6.658	4	0.025	1.2	
223	2011/10/05	11:40 13.489	27.46389	-112.54829	7.418	6	0.055	1.3	
224	2011/10/10	15:29 24.0	27.40800	-112.64000	7.0	8	0.07	1.2	
225	2011/10/12	07:19 23.270	27.61357	-112.46240	8.922	6	0.054	1.4	
226	2011/10/13	08:05 4.058	27.52382	-112.55844	5.583	5	0.029	1.2	
227	2011/10/13	09:24 9.447	27.60721	-112.46215	8.998	5	0.036	1.9	
228	2011/10/14	09:11 34.283	27.36699	-112.58546	5.890	5	0.056	1.4	
229	2011/10/14	12:10 34.248	27.48375	-112.58637	5.499	4	0.068	1.4	
230	2011/10/15	02:34 10.971	27.41735	-112.57407	6.255	5	0.065	1.3	
231	2011/10/15	07:37 5.925	27.47906	-112.59558	4.186	6	0.061	1.1	
232	2011/10/17	02:09 15.536	27.45243	-112.59454	5.365	6	0.044	1.1	
233	2011/10/17	17:50 48.431	27.49720	-112.58826	5.381	6	0.086	0.7	
234	2011/10/19	08:14 8.394	27.37608	-112.53089	5.609	7	0.084	1.2	
235	2011/10/19	10:32 28.011	27.37228	-112.57502	6.659	7	0.050	1.7	
236	2011/10/22	15:53 16.025	27.47740	-112.58748	4.935	6	0.054	1.5	
237	2011/10/25	02:04 57.401	27.43443	-112.56836	4.383	4	0.055	1.0	
238	2011/10/28	15:43 45.745	27.37402	-112.56132	5.660	5	0.050	1.6	
239	2011/10/31	17:31 53.439	27.57800	-112.55067	8.259	5	0.024	1.0	
240	2011/11/06	09:56 23.629	27.45536	-112.58923	5.650	4	0.025	1.3	
241	2011/11/06	17:36 16.197	27.42967	-112.62754	6.770	6	0.071	1.4	
242	2011/11/09	04:02 57.759	27.48246	-112.59379	4.905	5	0.052	2.3	
243	2011/11/13	13:13 36.159	27.33401	-112.53987	6.064	5	0.032	2.2	
244	2011/11/14	04:29 16.809	27.41445	-112.61906	6.488	5	0.075	1.6	
245	2011/11/15	14:37 25.096	27.46842	-112.58913	3.700	5	0.049	1.3	
246	2011/11/22	12:29 9.053	27.43303	-112.61959	5.726	4	0.052	1.5	
247	2011/11/25	17:18 37.797	27.45904	-112.57510	5.124	5	0.060	2.2	
248	2011/11/27	08:32 1.888	27.42511	-112.56490	6.608	4	0.075	1.0	
249	2011/11/28	00:45 22.908	27.40032	-112.53536	6.150	5	0.084	1.4	
250	2011/11/29	16:11 50.497	27.44946	-112.59479	6.149	5	0.093	1.6	
251	2011/12/05	19:35 26.237	27.39077	-112.52119	6.014	5	0.053	2.1	
252	2011/12/11	01:29 5.440	27.38509	-112.53148	5.806	4	0.087	1.6	
253	2011/12/11	17:15 27.369	27.37885	-112.56785	6.169	5	0.071	2.1	
254	2011/12/14	10:55 53.480	27.50191	-112.56695	4.926	5	0.026	1.7	
255	2011/12/21	01:38 57.186	27.49711	-112.56888	4.904	5	0.086	1.8	
256	2011/12/24	15:20 49.565	27.56811	-112.54185	8.032	5	0.058	1.0	
257	2011/12/31	23:11 50.646	27.44534	-112.58804	5.893	5	0.047	1.6	
SSN-9	2012/01/01	11:13:01	27.63000	-112.38000	10.0			3.5	
SSN-10	2012/01/01	12:53:50	27.18000	-112.04000	6.0			3.6	
258	2012/01/02	20:21:10.274	27.49556	-112.57746	5.077	5	0.090	0.8	
259	2012/01/03	16:59:29.242	27.39557	-112.50789	6.143	6	0.037	1.4	

260	2012/01/03	17:59:35.519	27.40253	-112.51953	5.479	4	0.064	1.1	
261	2012/01/06	13:18:56.554	27.41903	-112.56472	6.465	6	0.073	1.7	
262	2012/01/06	20:02:42.299	27.41602	-112.56342	6.803	6	0.083	1.3	
263	2012/01/08	13:35:20.503	27.34756	-112.52203	4.804	6	0.052	1.6	
264	2012/01/10	13:08:54.965	27.47476	-112.58626	4.625	6	0.069	2.1	
265	2012/01/12	15:15:43.955	27.54254	-112.49319	10.937	5	0.042	1.1	
266	2012/01/12	22:08:51.475	27.64313	-112.61600	9.190	8	0.056	1.4	
267	2012/01/18	04:45:51.197	27.51991	-112.55285	6.452	7	0.101	1.3	
268	2012/01/19	00:43:08.409	27.51005	-112.58475	5.230	7	0.101	0.8	
269	2012/01/19	00:43:26.140	27.50810	-112.58571	5.334	7	0.063	1.1	
270	2012/01/20	06:57:28.615	27.50904	-112.57816	5.293	4	0.057	1.0	
271	2012/01/20	06:58:51.914	27.50978	-112.58155	5.514	5	0.055	1.1	
272	2012/01/21	15:20:25.391	27.41231	-112.50692	6.303	5	0.049	1.3	
273	2012/01/21	21:42:30.642	27.40078	-112.49440	6.367	8	0.068	2.1	
274	2012/01/22	02:06:57.776	27.52254	-112.53533	6.052	6	0.070	0.9	
275	2012/01/23	11:15:54.772	27.48145	-112.59646	5.517	6	0.130	1.2	
276	2012/01/25	03:42:21.994	27.40198	-112.53709	6.556	7	0.060	1.5	
277	2012/01/25	19:03:10.598	27.51740	-112.55619	5.406	7	0.071	1.4	
278	2012/01/30	09:11:22.223	27.53483	-112.56136	5.955	5	0.025	1.0	
279	2012/01/31	02:19:49.706	27.45090	-112.65145	6.000	5	0.079	1.0	
280	2012/02/01	13:25:54.347	27.29919	-112.53768	3.358	5	0.052	1.9	
281	2012/02/01	15:16:28.692	27.52163	-112.57511	5.452	4	0.049	0.3	
282	2012/02/02	06:53:29.830	27.51223	-112.55997	5.306	4	0.020	2.3	
283	2012/02/02	15:56:43.228	27.51429	-112.55846	4.973	4	0.027	0.8	
284	2012/02/03	00:24:09.663	27.44397	-112.60581	4.668	5	0.038	1.3	
285	2012/02/03	06:39:02.917	27.51506	-112.63998	5.851	6	0.076	1.3	
286	2012/02/03	06:39:43.037	27.51648	-112.64771	6.360	7	0.073	1.0	
287	2012/02/04	15:02:23.157	27.49796	-112.60059	4.770	6	0.044	1.9	
288	2012/02/08	19:04:08.015	27.44121	-112.57429	4.075	6	0.036	0.8	
289	2012/02/08	19:46:00.137	27.32961	-112.43557	3.408	8	0.060	2.0	
290	2012/02/12	03:24:59.236	27.52811	-112.55438	4.717	7	0.052	1.3	
291	2012/02/12	03:25:54.688	27.52981	-112.55708	4.675	5	0.077	1.1	
292	2012/02/12	03:27:34.889	27.52719	-112.55315	4.286	6	0.046	1.7	
293	2012/02/12	03:28:03.936	27.52749	-112.55586	4.638	6	0.036	1.6	
294	2012/02/12	03:28:57.739	27.52271	-112.55917	4.281	6	0.020	0.9	
295	2012/02/12	03:40:50.024	27.52475	-112.55620	4.191	7	0.040	1.8	
296	2012/02/12	03:43:15.461	27.52363	-112.55793	4.348	5	0.023	1.2	
297	2012/02/12	04:04:43.466	27.52268	-112.55470	3.717	4	0.052	0.7	
298	2012/02/12	12:22:43.296	27.41377	-112.50824	6.019	6	0.027	2.0	
299	2012/02/14	18:37:06.390	27.43759	-112.48869	6.503	5	0.032	2.1	
300	2012/02/14	18:51:25.219	27.43723	-112.49384	6.465	6	0.050	1.8	
301	2012/02/16	07:32:28.041	27.44716	-112.65121	6.537	6	0.049	1.1	
302	2012/02/17	04:02:00.879	27.57894	-112.55143	8.248	6	0.036	1.1	
303	2012/02/18	01:55:46.400	27.59378	-112.56065	9.651	7	0.034	1.0	
304	2012/02/19	01:16:49.827	27.51812	-112.55720	5.299	4	0.055	0.8	
305	2012/02/20	19:15:02.809	27.40183	-112.49011	6.176	5	0.029	2.6	5
306	2012/02/20	21:22:43.580	27.51750	-112.58135	5.902	4	0.053	2.1	
307	2012/02/21	02:38:23.706	27.39960	-112.49734	6.154	6	0.049	1.4	5
308	2012/02/21	02:42:10.743	27.40390	-112.50321	6.096	4	0.046	2.6	5
309	2012/02/21	02:44:31.038	27.39874	-112.50067	6.041	6	0.050	1.1	5
310	2012/02/21	02:45:03.416	27.58328	-112.55443	8.344	6	0.023	1.1	
311	2012/02/21	02:50:38.819	27.58152	-112.55702	8.492	6	0.015	0.9	
312	2012/02/21	02:54:45.986	27.40842	-112.49590	6.266	4	0.079	2.3	5
313	2012/02/21	10:48:02.798	27.40365	-112.50047	6.259	5	0.031	1.3	5
314	2012/02/21	23:24:41.061	27.58450	-112.55191	6.955	6	0.055	1.2	
315	2012/02/21	23:50:38.436	27.57152	-112.55269	8.394	6	0.034	1.2	
316	2012/02/23	08:41:42.199	27.36582	-112.50362	5.074	7	0.047	1.5	5
317	2012/02/25	06:04:23.483	27.50933	-112.56358	5.142	6	0.060	0.2	

318	2012/02/25	06:08:35.119	27.50746	-112.56519	5.012	7	0.037	0.5	
319	2012/02/26	00:59:33.614	27.44870	-112.61163	4.702	7	0.056	1.2	
320	2012/02/29	19:48:52.213	27.39007	-112.54971	6.314	7	0.045	1.5	
321	2012/02/29	19:49:34.333	27.38262	-112.54869	6.163	5	0.042	1.4	
322	2012/03/03	05:52:09.236	27.44633	-112.58787	5.871	8	0.080	1.4	
323	2012/03/04	18:10:17.923	27.55469	-112.55534	6.982	6	0.033	1.3	
324	2012/03/04	19:29:32.581	27.49742	-112.52604	6.220	7	0.050	1.3	
325	2012/03/10	01:41:59.303	27.42311	-112.55518	6.451	6	0.075	1.4	
326	2012/03/10	02:35:39.184	27.42182	-112.55473	6.662	7	0.088	1.0	
327	2012/03/13	15:50:37.403	27.51318	-112.56290	5.326	5	0.055	0.8	
328	2012/03/13	22:07:17.642	27.45580	-112.56031	4.448	8	0.040	1.5	
329	2012/03/13	22:40:53.970	27.45520	-112.56146	3.904	7	0.036	1.3	
330	2012/03/15	06:50:44.206	27.68229	-112.67010	4.192	7	0.045	1.8	
331	2012/03/15	07:08:50.691	27.68143	-112.67252	4.251	7	0.049	2.1	
332	2012/03/19	17:18:44.616	27.33422	-112.52617	4.853	7	0.008	2.3	
333	2012 321	12:52:52.353	27.46916	-112.60030	1.785	6	0.040	1.1	
334	2012/03/21	21:31:32.630	27.51352	-112.56832	4.429	4	0.030	1.1	
335	2012/03/22	23:52:19.046	27.49770	-112.58485	5.283	5	0.106	1.0	
336	2012/03/27	04:01:36.973	27.46196	-112.61809	3.321	7	0.035	1.0	
337	2012/03/27	19:53:11.948	27.41808	-112.53851	6.511	6	0.046	1.5	
338	2012/03/27	21:13:35.842	27.49719	-112.58470	5.263	6	0.086	1.0	
339	2012/03/28	10:16:02.786	27.51915	-112.55601	6.677	7	0.118	1.0	
340	2012/03/31	05:20:24.102	27.51248	-112.55820	5.537	8	0.045	1.7	
341	2012/03/31	05:47:57.351	27.51486	-112.55687	5.402	7	0.027	1.5	
342	2012/04/03	11:32:30.477	27.45111	-112.53260	4.580	8	0.044	1.8	
343	2012/04/03	18:20:31.238	27.44033	-112.54773	4.756	5	0.041	1.4	
344	2012/04/05	11:23:52.377	27.48294	-112.59086	4.465	6	0.060	1.5	
345	2012/04/05	17:32:23.328	27.48035	-112.59149	4.866	7	0.034	1.5	
346	2012/04/06	01:17:25.499	27.52173	-112.54626	3.901	4	0.028	1.4	
347	2012/04/07	03:58:04.873	27.51523	-112.58335	5.524	6	0.078	1.1	
348	2012/04/07	07:55:24.456	27.52948	-112.57500	3.939	5	0.064	1.7	
349	2012/04/08	05:44:34.474	27.52703	-112.57773	3.586	5	0.048	2.0	
350	2012/04/08	10:04:10.054	27.43356	-112.58707	5.015	8	0.088	1.6	
351	2012/04/09	02:57:38.800	27.50967	-112.56184	4.881	7	0.053	1.8	
352	2012/04/09	12:35:50.743	27.47691	-112.60617	3.698	8	0.024	1.9	
353	2012/04/09	14:02:38.552	27.51371	-112.55816	5.559	8	0.031	1.8	
354	2012/04/10	04:16:03.036	27.51240	-112.55869	5.191	5	0.013	0.8	
355	2012/04/10	04:20:44.367	27.60726	-112.47369	9.078	6	0.054	1.3	
SSN-11	2012/04/12	02:05:59	28.79000	-113.43000	15.0			6	
SSN-12	2012/04/12	02:15:49	28.78000	-113.43000	10.0			6.8	
356	2012/04/12	11:01:13.621	27.51346	-112.56210	5.116	5	0.037	0.6	
357	2012/04/12	14:10:47.723	27.51852	-112.59948	5.005	8	0.057	1.2	
358	2012/04/12	15:13:43.190	27.52011	-112.57905	5.482	6	0.043	1.0	
359	2012/04/12	15:59:35.998	27.51519	-112.61112	5.243	8	0.042	0.8	
360	2012/04/12	17:03:38.544	27.50672	-112.57147	4.247	4	0.052	1.5	
361	2012/04/12	19:28:50.051	27.56662	-112.49610	9.339	7	0.025	1.3	
362	2012/04/12	22:19:25.324	27.50114	-112.57150	4.390	6	0.045	1.1	
363	2012/04/12	22:34:33.761	27.51383	-112.55865	5.429	7	0.029	1.1	
364	2012/04/13	01:25:30.551	27.51502	-112.58243	5.319	7	0.064	2.2	
365	2012/04/13	02:17:21.022	27.55876	-112.49122	9.727	6	0.025	1.4	7
366	2012/04/13	11:36:50.418	27.56503	-112.47280	9.896	5	0.024	1.7	7
367	2012/04/13	11:39:52.263	27.49417	-112.59648	1.465	6	0.049	1.6	6
368	2012/04/13	19:34:13.337	27.49884	-112.60036	5.021	8	0.056	1.8	6
369	2012/04/13	19:46:30.749	27.49685	-112.60120	4.987	8	0.070	1.6	6
370	2012/04/14	01:12:59.739	27.49805	-112.60077	4.705	5	0.049	0.8	6
371	2012/04/14	05:13:17.789	27.58748	-112.41869	6.574	8	0.037	2.9	7
372	2012/04/14	18:32:42.903	27.58229	-112.42511	5.640	8	0.040	2.1	7
373	2012/04/15	17:11:21.006	27.55722	-112.49307	9.148	7	0.055	1.1	7

374	2012/04/15	23:19:17.498	27.58831	-112.43751	5.772	8	0.056	2.0	7
375	2012/04/16	00:57:13.680	27.58511	-112.41908	8.482	8	0.052	1.8	7
376	2012/04/16	03:01:52.285	27.53080	-112.58842	5.473	5	0.027	0.7	
377	2012/04/16	10:40:08.304	27.61878	-112.68616	5.708	8	0.067	2.1	
378	2012/04/17	02:52:26.044	27.57999	-112.41924	9.049	7	0.029	1.7	7
379	2012/04/17	03:28:06.854	27.52153	-112.55492	5.565	6	0.073	1.1	
380	2012/04/17	09:06:40.224	27.50024	-112.49889	7.191	5	0.049	1.3	
381	2012/04/17	16:51:42.451	27.52176	-112.54031	3.376	4	0.031	1.1	
382	2012/04/18	02:05:23.597	27.49761	-112.53877	3.645	6	0.038	2.3	
383	2012/04/18	03:37:46.992	27.49945	-112.54055	3.655	6	0.029	1.8	
384	2012/04/18	15:05:51.978	27.52343	-112.63639	7.362	7	0.086	1.4	
385	2012/04/19	07:21:15.211	27.47516	-112.57303	5.668	7	0.058	2.4	6
386	2012/04/20	10:05:22.739	27.47886	-112.59460	5.504	7	0.077	1.3	6
387	2012/04/21	17:26:37.747	27.51220	-112.55969	4.883	6	0.035	1.2	
388	2012/04/21	23:29:38.587	27.55926	-112.49344	9.144	7	0.042	1.4	
SSN-13	2012/05/01	19:21:52	27.40000	-112.17000	20.0	5		3.1	
389	2012/05/02	17:42:54.963	27.51274	-112.57944	4.824	5	0.043	0.9	
390	2012/05/02	17:43:13.604	27.51243	-112.58056	5.381	5	0.061	1.4	
391	2012/05/02	20:44:06.669	27.51930	-112.58412	5.587	4	0.029	0.9	
392	2012/05/02	21:15:39.499	27.52297	-112.61234	5.352	7	0.054	1.1	
393	2012/05/05	15:16:40.949	27.37169	-112.55243	5.892	5	0.021	1.4	
394	2012/05/07	22:22:17.771	27.44722	-112.58814	2.000	7	0.040	1.7	
395	2012/05/07	23:14:27.835	27.44563	-112.58701	3.763	7	0.028	1.7	
396	2012/05/11	08:53:53.036	27.38167	-112.52322	6.322	6	0.038	1.6	
397	2012/05/12	03:19:08.675	27.57032	-112.57902	7.314	7	0.057	1.6	
398	2012/05/18	14:11:09.072	27.44529	-112.67505	6.487	7	0.077	1.6	8
399	2012/05/19	1223:44.564	27.44935	-112.66901	6.918	7	0.085	1.9	8
400	2012/05/19	1333:40.590	27.44670	-112.67972	6.584	7	0.054	1.9	8
401	2012/05/19	1612:29.305	27.44579	-112.67542	6.523	7	0.067	1.6	8
402	2012/05/19	1808:57.796	27.44754	-112.66984	7.104	7	0.058	1.5	8
403	2012/05/19	1910:39.732	27.44888	-112.66548	6.284	7	0.076	1.5	8
404	2012/05/21	1720:02.754	27.44185	-112.67424	7.127	7	0.049	1.7	8
405	2012/05/24	0214:31.056	27.44332	-112.48702	6.438	5	0.041	2.0	
406	2012/05/25	1214:40.450	27.43897	-112.66642	6.289	5	0.065	1.3	8
407	2012/06/02	09:16:07.797	27.43933	-112.68381	9.510	4	0.022	1.6	
408	2012/06/02	09:30:01.340	27.44905	-112.67324	9.231	4	0.011	1.0	8
409	2012/06/02	18:15:14.186	27.44912	-112.66577	8.239	5	0.030	1.7	8
410	2012/06/03	15:23:51.953	27.35213	-112.53152	6.274	4	0.043	1.4	
411	2012/06/19	04:11:58.538	27.39380	-112.51241	9.197	5	0.046	2.0	
SSN-14	2012/06/27	04:31:52	27.55000	-112.36000	20.0	5		3.6	
412	2012/06/28	20:12:26.544	27.40876	-112.52590	6.557	5	0.043	1.5	
413	2012/06/29	02:48:36.892	27.43678	-112.52349	5.119	5	0.033	1.9	
414	2012/06/29	12:29:04.637	27.43444	-112.52237	4.874	5	0.039	1.5	
415	2012/07/02	18:12:45.204	27.51081	-112.59589	5.312	4	0.015	1.6	
416	2012/07/07	13:32:30.481	27.44615	-112.58845	6.553	5	0.044	1.4	
417	2012/07/07	21:41:23.745	27.52318	-112.61349	4.357	5	0.030	1.9	
418	2012/07/09	18:57:21.132	27.53179	-112.56719	7.113	5	0.037	1.4	
419	2012/07/18	09:51:43.362	27.42215	-112.55698	6.204	7	0.048	0.9	
420	2012/07/20	23:13:57.813	27.43987	-112.60654	9.193	8	0.060	1.3	
421	2012/07/21	15:24:46.735	27.50863	-112.56589	4.684	5	0.060	1.2	
422	2012/07/21	15:32:57.609	27.51037	-112.56363	4.472	5	0.062	1.2	
423	2012/07/27	08:41:44.761	27.44714	-112.55888	4.854	7	0.051	1.4	
424	2012/07/28	02:24:06.568	27.49099	-112.59039	4.729	6	0.040	1.2	
425	2012/07/28	12:30:26.864	27.43601	-112.51526	6.402	7	0.073	1.5	
426	2012/08/02	05:58:40.995	27.59996	-112.41663	4.930	7	0.045	1.9	
427	2012/08/02	11:28:16.014	27.40199	-112.57220	6.192	7	0.068	1.6	
SSN-15	2012/08/03	15:08:39	27.40200	-112.16000	20.0			3.0	
428	2012/08/06	10:54:04.221	27.61847	-112.55901	9.397	8	0.037	1.9	

429	2012/08/06	16:31:09.731	27.51074	-112.56554	4.800	4	0.044	0.3	
430	2012/08/08	13:30:36.000	27.52954	-112.54630	6.124	6	0.069	1.7	
431	2012/08/08	19:33:20.504	27.37617	-112.55564	5.905	7	0.053	2.2	
432	2012/08/10	01:17:01.858	27.53263	-112.61218	4.732	5	0.038	1.9	
433	2012/08/12	12:49:17.968	27.52404	-112.56472	3.568	5	0.014	1.5	
434	2012/08/15	23:09:28.208	27.40602	-112.51696	5.959	7	0.045	2.4	
435	2012/08/19	01:48:43.343	27.38160	-112.52498	5.569	6	0.036	1.4	
436	2012/08/19	13:30:19.982	27.48820	-112.52594	5.954	6	0.065	1.3	
437	2012/08/26	06:43:57.896	27.37628	-112.51619	5.399	6	0.033	1.8	
438	2012/09/01	17:43:20.474	27.39999	-112.68390	5.531	6	0.073	1.9	
439	2012/09/01	22:34:13.507	27.43771	-112.55721	6.981	6	0.033	1.5	
440	2012/09/02	02:06:34.177	27.44560	-112.61256	5.859	7	0.068	1.7	
441	2012/09/02	03:11:07.525	27.44575	-112.61120	6.167	7	0.084	1.5	
442	2012/09/02	13:44:39.599	27.44604	-112.47603	6.666	7	0.062	2.3	
443	2012/09/04	01:31:31.234	27.45451	-112.60715	8.513	6	0.051	1.8	
444	2012/09/06	06:59:20.316	27.47481	-112.59397	4.043	6	0.046	1.6	
445	2012/09/06	09:59:51.713	27.50202	-112.66036	6.760	7	0.031	0.4	
446	2012/09/08	08:46:23.589	27.37417	-112.55492	5.875	7	0.054	2.3	
447	2012/09/09	03:07:00.550	27.40471	-112.52502	6.189	7	0.051	2.2	
448	2012/09/09	10:46:25.814	27.36971	-112.54874	5.969	7	0.045	1.8	
449	2012/09/10	08:29:00.801	27.46299	-112.67699	6.748	7	0.019	1.7	
450	2012/09/10	12:40:32.413	27.41742	-112.69833	5.967	7	0.047	1.9	9
451	2012/09/10	12:43:00.310	27.41694	-112.70010	6.106	6	0.041	1.7	9
452	2012/09/10	15:14:00.548	27.41910	-112.70074	6.176	6	0.039	2.3	9
453	2012/09/26	19:18:17.597	27.51519	-112.55724	5.092	6	0.015	1.7	
454	2012/10/06	20:06:49.881	27.51827	-112.56057	5.107	4	0.016	1.2	
455	2012/10/08	10:30:55.401	27.41940	-112.70248	6.525	6	0.045	1.9	9
456	2012/10/08	10:40:15.050	27.41896	-112.70056	6.122	6	0.026	1.4	9
457	2012/10/08	23:40:09.900	27.41800	-112.70400	6.800	6	0.040	1.7	9
458	2012/10/09	11:37:56.451	27.38379	-112.55141	5.898	6	0.022	2.5	
459	2012/10/09	12:26:08.900	27.41600	-112.69500	6.000	6	0.040	2.1	
460	2012/10/18	02:15:47.100	27.47400	-112.58400	4.300	6	0.050	1.8	
461	2012/10/21	09:09:58.442	27.56987	-112.48605	6.681	4	0.014	1.5	
462	2012/10/22	06:10:31.859	27.50769	-112.56300	4.027	5	0.037	2.0	
463	2012/10/23	03:54:36.833	27.37019	-112.55725	5.950	6	0.027	2.5	
464	2012/10/25	16:39:55.092	27.45968	-112.57845	1.503	4	0.079	0.8	
465	2012/10/26	04:33:25.391	27.40949	-112.52650	6.247	7	0.031	2.2	
466	2012/10/26	10:12:46.554	27.41631	-112.51966	6.659	7	0.044	1.8	
SSN-16	2012/11/01	17:03:10	27.39000	-112.16000	5.0			3.1	
467	2012/11/05	16:50:08.855	27.49904	-112.57970	3.598	5	0.048	1.6	
468	2012/11/05	16:53:21.362	27.49730	-112.58218	3.145	5	0.033	1.8	
469	2012/11/05	17:06:08.353	27.50736	-112.57251	3.689	4	0.019	1.3	
470	2012/11/05	17:16:08.703	27.50569	-112.57823	3.683	4	0.016	1.1	
471	2012/11/06	03:46:14.860	27.50838	-112.57720	3.905	4	0.035	1.5	
472	2012/11/06	11:47:49.399	27.48071	-112.59646	4.230	6	0.014	1.9	
473	2012/11/08	08:12:49.295	27.40301	-112.54611	6.176	6	0.025	1.7	
474	2012/11/08	11:05:23.616	27.48524	-112.59524	4.314	6	0.015	1.9	
475	2012/11/15	00:57:16.176	27.40112	-112.54201	6.192	7	0.030	1.6	
476	2012/11/15	02:05:56.426	27.40507	-112.53941	6.457	6	0.074	1.9	
477	2012/11/15	07:44:45.864	27.51723	-112.55451	3.606	5	0.023	2.1	
478	2012/11/21	03:40:56.979	27.39982	-112.54431	5.827	7	0.048	2.2	
479	2012/11/23	10:42:12.905	27.51726	-112.55812	5.115	6	0.091	1.2	
480	2012/11/23	11:01:12.176	27.51538	-112.56155	4.323	5	0.030	1.5	
481	2012/11/26	08:54:25.504	27.51993	-112.55800	4.242	6	0.020	1.7	
482	2012/11/26	09:01:11.465	27.52696	-112.55431	3.863	6	0.042	1.7	
483	2012/11/26	09:04:31.017	27.51284	-112.56004	4.261	7	0.041	2.0	
484	2012/11/26	09:57:06.103	27.51263	-112.56341	5.434	9	0.019	2.5	
485	2012/11/26	10:34:49.309	27.52767	-112.55541	4.338	7	0.045	1.7	

486	2012/11/28	16:56:00.714	27.35074	-112.45335	5.126	8	0.038	2.2	
487	2012/11/30	16:17:06.353	27.45821	-112.67255	6.409	7	0.015	2.1	
488	2012/11/30	18:36:28.923	27.49037	-112.59328	5.082	6	0.071	1.1	
489	2012/12/01	10:01:33.252	27.50501	-112.58908	5.397	7	0.085	1.6	
490	2012/12/04	22:41:32.007	27.34300	-112.51458	4.733	8	0.035	1.7	
491	2012/12/06	01:51:05.956	27.52794	-112.54912	4.059	5	0.046	1.1	
SSN-17	2012/12/08	13:11:20	27.40000	-112.16000	20.0			3.1	
492	2012/12/08	16:39:30.178	27.52274	-112.55583	3.457	6	0.017	2.0	10
493	2012/12/08	16:49:32.707	27.52024	-112.55330	4.161	7	0.037	2.4	10
494	2012/12/08	16:53:50.329	27.52281	-112.55125	5.057	8	0.037	2.4	10
495	2012/12/08	17:13:55.381	27.51186	-112.55780	5.604	5	0.031	1.8	10
496	2012/12/08	17:20:03.823	27.51546	-112.55717	3.643	5	0.048	1.2	10
497	2012/12/08	17:21:54.346	27.52821	-112.54859	4.630	6	0.054	1.7	10
498	2012/12/08	17:35:14.204	27.51878	-112.55827	4.256	6	0.075	1.0	10
499	2012/12/08	17:50:10.737	27.52171	-112.55317	4.361	7	0.072	2.6	10
500	2012/12/08	18:02:34.623	27.51513	-112.54797	1.124	4	0.072	2.2	10
501	2012/12/08	21:16:43.000	27.51040	-112.55846	3.681	6	0.075	1.8	10
502	2012/12/08	21:18:25.762	27.51120	-112.56138	3.931	5	0.062	1.7	10
503	2012/12/17	20:31:51.160	27.44867	-112.57117	2.000	5	0.067	1.4	
504	2013/02/05	04:17:54.434	27.36831	-112.56678	0.505	7	0.074	1.9	
505	2013/02/12	07:03:43.101	27.44749	-112.67397	6.568	7	0.087	1.7	
506	2013/03/06	19:30:45.969	27.40751	-112.50993	6.373	7	0.013	1.9	
507	2013/03/06	22:05:43.954	27.41111	-112.52531	5.482	6	0.038	2.3	
508	2013/04/18	05:46:8.460	27.31837	-112.54048	5.000	8	0.076	2.1	
509	2013/05/07	18:16:33.979	27.39467	-112.47813	5.525	6	0.069	2.2	
510	2013/05/15	19:38:28.365	27.60050	-112.51114	9.700	6	0.034	2.0	
511	2013/05/19	09:59:27.823	27.50848	-112.57896	6.373	7	0.060	1.3	
512	2013/05/21	14:32:6.670	27.51562	-112.54716	4.249	5	0.066	1.7	
513	2013/05/24	14:12:28.314	27.40055	-112.52237	6.129	7	0.048	1.8	
514	2013/06/03	05:49:11.777	27.51646	-112.58074	5.900	8	0.059	2.2	
515	2013/06/17	05:31:12.846	27.59912	-112.54827	6.900	8	0.029	3.0	
516	2013/06/21	04:07:53.088	27.37626	-112.54482	5.578	7	0.052	1.9	
517	2013/06/22	11:56:08.189	27.60431	-112.41925	8.200	7	0.052	2.3	
518	2013/06/23	01:16:39.014	27.58710	-112.42520	4.858	6	0.051	1.2	
519	2013/07/01	22:13:55.097	27.53049	-112.56145	5.477	4	0.041	1.1	
520	2013/07/02	13:20:50.433	27.42932	-112.56223	6.851	5	0.041	2.1	
521	2013/07/02	13:38:03.068	27.48451	-112.59176	5.020	5	0.061	2.0	
522	2013/07/04	10:18:52.394	27.45641	-112.59574	7.144	6	0.033	2.9	11
523	2013/07/04	10:51:27.610	27.46023	-112.59432	6.132	5	0.038	2.2	11
524	2013/07/04	11:58:22.036	27.45505	-112.59951	6.057	5	0.022	1.8	11
525	2013/07/04	13:14:01.736	27.45453	-112.59966	6.286	4	0.026	1.7	11
526	2013/07/04	16:21:23.369	27.45397	-112.59647	5.785	5	0.034	1.9	11
527	2013/07/04	17:47:04.382	27.45679	-112.59882	6.090	5	0.012	1.7	11
528	2013/07/06	14:40:47.775	27.45604	-112.59399	5.890	6	0.047	2.3	11
529	2013/07/08	09:38:19.766	27.52655	-112.57343	5.226	5	0.065	1.6	
530	2013/07/09	04:55:22.955	27.53762	-112.54920	4.513	6	0.054	1.5	
531	2013/07/11	21:53:25.963	27.49202	-112.58839	5.258	7	0.060	2.0	
532	2013/07/12	10:06:19.552	27.50180	-112.53374	3.702	4	0.036	2.4	
533	2013/07/12	18:07:27.403	27.60165	-112.54979	6.087	7	0.082	2.5	
534	2013/07/15	04:35:10.633	27.46412	-112.55132	9.223	6	0.032	2.1	
535	2013/07/16	15:36:59.793	27.58462	-112.55206	6.645	7	0.081	2.3	
536	2013/07/20	13:35:54.262	27.59903	-112.45575	4.683	6	0.062	1.9	
537	2013/07/21	05:01:53.509	27.52736	-112.54868	4.176	5	0.029	1.6	
538	2013/07/24	00:03:53.828	27.44198	-112.50758	6.660	7	0.043	2.1	
539	2013/07/25	14:45:03.685	27.51705	-112.56536	5.028	5	0.046	1.7	
540	2013/07/26	07:14:19.947	27.51481	-112.58314	7.821	7	0.080	2.0	
541	2013/07/26	16:25:50.936	27.51672	-112.57932	4.808	6	0.080	1.5	
542	2013/07/28	21:29:28.142	27.35820	-112.53481	5.600	7	0.042	2.4	

543	2013/07/29	08:59:04.946	27.41112	-112.54488	6.452	5	0.038	1.8	
544	2013/07/31	00:50:43.085	27.51877	-112.54748	4.759	7	0.060	2.1	
545	2013/07/31	09:09:16.936	27.47702	-112.59483	4.003	5	0.053	1.7	
546	2013/08/02	07:46:12.762	27.48130	-112.58918	3.921	6	0.013	2.1	
547	2013/08/03	10:29:53.932	27.52199	-112.55141	4.188	7	0.023	1.9	
548	2013/08/03	10:53:27.913	27.43389	-112.50534	6.742	7	0.019	2.7	
549	2013/08/03	11:02:59.496	27.48012	-112.49355	6.434	5	0.046	1.9	
550	2013/08/05	04:51:06.436	27.40667	-112.51158	5.901	6	0.035	2.3	
551	2013/08/06	18:04:32.338	27.51683	-112.55650	4.191	6	0.048	2.2	
552	2013/08/17	12:01:28.980	27.48281	-112.56882	4.158	7	0.026	2.3	
553	2013/08/19	09:29:16.617	27.52816	-112.55513	6.754	6	0.048	1.9	
554	2013/10/01	00:45:18.985	27.47044	-112.61430	3.940	4	0.010	2.3	
555	2013/10/06	02:26:26.010	27.43534	-112.70361	5.530	4	0.021	1.6	
556	2013/10/15	10:28:51.873	27.47370	-112.59106	4.449	4	0.047	2.2	
557	2013/10/17	19:40:27.000	27.48610	-112.60007	3.827	4	0.031	1.9	
558	2013/10/21	14:42:35.254	27.48958	-112.59745	4.351	5	0.040	1.3	
559	2013/10/22	05:47:55.986	27.52184	-112.58447	5.024	4	0.032	1.4	
560	2013/10/22	06:06:04.980	27.47092	-112.62301	5.021	4	0.025	1.6	
561	2013/10/25	07:14:13.784	27.46877	-112.62090	5.288	5	0.032	1.9	
562	2013/10/29	15:34:36.477	27.46670	-112.60348	4.153	4	0.031	2.9	
563	2013/10/29	16:32:01.234	27.46358	-112.60261	5.422	4	0.036	2.3	
564	2013/10/31	18:38:25.487	27.52335	-112.56138	5.543	4	0.027	2.3	12
565	2013/11/02	02:39:30.820	27.52316	-112.55773	4.113	4	0.032	2.1	12
566	2013/11/02	02:46:50.438	27.52351	-112.55896	4.157	4	0.031	1.6	12
567	2013/11/03	15:11:09.715	27.42535	-112.64157	6.517	4	0.005	2.3	13
568	2013/11/03	16:22:36.840	27.42652	-112.64175	6.492	4	0.007	2.4	13
569	2013/11/04	00:30:20.693	27.42631	-112.64526	6.421	4	0.013	1.8	13
570	2013/11/04	01:03:57.593	27.42738	-112.64534	6.421	4	0.024	1.3	13
571	2013/11/07	08:52:22.175	27.42968	-112.55671	6.936	4	0.016	2.5	12
572	2013/11/07	08:54:58.053	27.42714	-112.55766	6.804	4	0.018	2.6	12
573	2013/11/27	18:38:50.259	27.43186	-112.66982	5.829	4	0.030	2.3	
574	2013/11/29	01:41:55.634	27.53737	-112.55975	5.544	4	0.030	2.6	12
575	2013/11/29	19:39:28.598	27.44550	-112.60105	5.706	4	0.027	2.2	

**Anexo 2.** Parámetros de fuente de 294 sismos. La numeración (N°) corresponde al N° de sismo según el Anexo 1. Fo= frecuencia esquina en Hz; R=radio de fractura en km, Mo=momento sísmico Nm;  $\Delta\sigma$ =caída de esfuerzo en MPa y Mw=magnitud de momento en grados.

N°	Fo (Hz)	R (Km)	Mo (Nm)	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Mw
20	7.83	0.1074	4.81E+09	0.0017	0.3
21	8.26	0.0915	2.98E+10	0.017	0.9
22	9.49	0.0809	8.71E+09	0.0072	0.5
23	13.4	0.0614	4.55E+09	0.0086	0.3
24	8.99	0.0842	1.62E+10	0.0119	0.7
25	8.52	0.0886	8.74E+09	0.0055	0.6
26	10.5	0.0728	4.32E+09	0.0049	0.4
27	6.16	0.1436	1.90E+10	0.0028	0.7
28	7.4	0.1724	1.18E+11	0.0101	0.7
29	7.19	0.105	4.50E+09	0.0017	0.4
30	9.21	0.0968	7.46E+11	0.36	1.7
31	9.89	0.0781	5.69E+10	0.0523	1.1
32	7.71	0.1023	1.22E+10	0.005	0.5
33	6.59	0.1273	5.66E+11	0.12	1.7
35	9.06	0.1115	5.45E+10	0.0172	0.8
37	14.8	0.0583	3.26E+11	0.72	1.4
45	8.57	0.0901	5.50E+10	0.0329	1.1
48	15	0.0567	3.50E+09	0.0084	0.2
49	15	0.0523	1.67E+10	0.0512	0.7
51	12.8	0.0732	1.08E+11	0.12	1.1
52	13.4	0.0602	2.09E+11	0.42	1.4
55	15.7	0.0496	1.28E+11	0.46	1.2
56	15.6	0.0498	3.39E+10	0.12	0.8
57	16	0.0482	3.07E+10	0.12	0.9
58	11	0.1056	1.88E+12	0.7	1.5
59	16.6	0.0471	5.49E+10	0.23	0.9
60	16.6	0.0478	8.66E+09	0.0347	0.4
61	8.63	0.0938	1.87E+10	0.0099	0.7
63	9.05	0.098	1.53E+10	0.0071	0.5
64	17.5	0.0437	8.20E+09	0.043	0.4
65	14.2	0.0533	2.73E+10	0.079	0.8
66	13	0.0645	2.96E+10	0.0483	0.9
67	12.3	0.0678	8.26E+09	0.0116	0.4
69	12.8	0.0723	5.24E+10	0.0607	0.8
71	14	0.0631	5.97E+09	0.0104	0.2
74	18.5	0.0409	5.36E+09	0.0343	0.4
76	17.4	0.0457	3.49E+10	0.16	0.9
77	14.1	0.0626	1.83E+10	0.0326	0.4
79	12.2	0.062	1.58E+10	0.029	0.7
82	9.35	0.0807	5.79E+10	0.0482	1.1
83	12.3	0.0721	1.20E+11	0.14	1.0
87	8.92	0.0953	2.71E+10	0.0137	0.6
90	7.28	0.1037	1.20E+10	0.0047	0.7
91	12.6	0.062	4.36E+09	0.008	0.4
96	11.3	0.213	3.75E+12	0.17	1.1
99	14.1	0.0589	5.14E+10	0.11	1.0
105	7.51	0.1005	2.27E+10	0.0098	0.8
114	7.11	0.1139	4.46E+10	0.0132	0.9
119	14.3	0.0536	1.20E+10	0.0341	0.6
122	13.3	0.0652	1.39E+11	0.22	1.2
125	14.8	0.0541	6.51E+10	0.18	1.1
127	12.7	0.0693	9.13E+10	0.12	1.1

143	10.3	0.1067	9.02E+10	0.0325	0.8
147	14.6	0.0538	1.04E+10	0.0292	0.5
150	13.8	0.0621	7.66E+10	0.14	1.0
155	5.84	0.2115	2.14E+11	0.0099	0.9
156	9.61	0.0861	1.34E+10	0.0092	0.6
159	15	0.0574	6.05E+10	0.14	0.9
162	12.1	0.0848	1.81E+11	0.13	0.9
163	8.66	0.0961	7.91E+09	0.0039	0.4
174	8.8	0.1043	4.36E+10	0.0168	0.8
175	5.89	0.1402	7.24E+10	0.0115	1.0
177	15.3	0.0522	5.82E+09	0.0179	0.4
178	10.5	0.0741	9.86E+09	0.0106	0.6
181	6.39	0.1235	6.46E+09	0.0015	0.4
182	14.9	0.0527	1.76E+10	0.0525	0.7
184	14.9	0.0609	1.63E+12	3.16	1.9
185	15.1	0.0559	8.07E+09	0.0202	0.5
187	15.2	0.0543	1.79E+11	0.49	1.4
188	15.1	0.0534	1.39E+11	0.4	1.3
190	10.2	0.0782	5.47E+09	0.005	0.4
194	13.5	0.062	3.11E+10	0.057	0.8
195	10.3	0.074	2.69E+11	0.29	1.5
197	13.6	0.0564	7.38E+10	0.18	1.1
198	13.5	0.0663	5.06E+10	0.0759	1.0
199	12.2	0.0634	3.15E+11	0.54	1.5
201	10.8	0.0823	7.77E+09	0.0061	0.5
202	9.96	0.105	1.28E+11	0.0485	1.0
203	18.7	0.0407	4.70E+11	3.05	1.7
204	14.1	0.0544	1.39E+10	0.0377	0.7
206	14.4	0.0561	9.81E+09	0.0243	0.5
207	13.1	0.0692	1.08E+12	1.43	1.6
208	9.98	0.0759	1.63E+10	0.0163	0.7
213	11.7	0.0646	2.16E+11	0.35	1.4
214	8.9	0.0884	2.72E+10	0.0172	0.9
215	10.6	0.0758	6.20E+10	0.0623	1.1
217	9.27	0.0828	1.95E+11	0.15	1.4
219	11.2	0.0705	9.61E+10	0.12	1.1
220	12.9	0.0662	2.00E+10	0.0301	0.7
221	14.1	0.0593	1.33E+11	0.28	1.2
222	9.53	0.0854	4.93E+10	0.0346	0.9
223	16.9	0.0466	5.55E+10	0.24	1.0
224	11.1	0.081	7.17E+10	0.059	1.0
225	8.43	0.0954	3.63E+10	0.0183	0.9
228	14.3	0.0575	4.78E+10	0.11	0.8
230	9.73	0.0781	7.62E+09	0.007	0.5
231	8.39	0.09	4.00E+09	0.0024	0.3
232	19.3	0.0393	3.30E+09	0.0238	0.3
233	14.3	0.056	8.23E+09	0.0205	0.4
235	14.2	0.0538	3.67E+11	1.03	1.6
236	9.84	0.0827	3.21E+10	0.0248	0.9
238	13.1	0.0607	3.27E+11	0.64	1.6
239	11.6	0.0746	1.04E+11	0.11	1.1
241	13.5	0.0579	1.54E+10	0.0348	0.7
242	12.8	0.0635	4.33E+11	0.74	1.6

245	7.82	0.1012	3.77E+10	0.0159	0.9
246	18.1	0.0422	4.47E+10	0.26	1.0
247	12.5	0.0621	1.15E+11	0.21	1.2
250	11.5	0.0666	2.90E+10	0.0429	0.8
251	14.4	0.0528	4.71E+10	0.14	1.1
253	15	0.0515	2.82E+10	0.0902	0.8
254	13.7	0.0568	9.38E+09	0.0224	0.6
255	14.2	0.0572	7.70E+10	0.18	1.0
257	9.42	0.0833	7.46E+10	0.0565	1.1
258	13.4	0.0631	8.44E+09	0.0147	0.5
259	11.5	0.0682	4.90E+10	0.0676	1.0
260	6.23	0.1212	2.16E+10	0.0053	0.8
261	8.51	0.0897	2.79E+10	0.0169	0.9
262	7.81	0.0973	2.34E+10	0.0111	0.8
263	14.4	0.0524	1.09E+11	0.33	1.3
264	7.45	0.1149	2.39E+11	0.0688	1.3
266	15.5	0.0532	4.82E+10	0.14	1.1
267	16.9	0.0463	1.12E+10	0.0494	0.6
268	14.9	0.0571	1.21E+10	0.0285	0.5
269	12.3	0.0656	3.54E+10	0.0549	0.9
271	13.8	0.0552	2.46E+09	0.0064	0.2
273	14.8	0.0558	3.65E+11	0.92	1.5
276	14.4	0.054	4.32E+10	0.12	1.0
277	10.9	0.0698	1.81E+10	0.0233	0.8
289	11.4	0.0741	1.67E+11	0.18	1.3
290	11.9	0.0734	6.04E+10	0.0668	0.9
292	11.2	0.0768	6.28E+10	0.0607	0.9
293	8.63	0.119	1.50E+11	0.0389	1.0
294	11.4	0.0777	2.77E+10	0.0258	0.7
295	11.4	0.0829	1.10E+11	0.0845	1
296	13.3	0.0621	2.15E+10	0.0393	0.6
298	10.5	0.0742	1.77E+11	0.19	1.4
300	12.9	0.0679	8.59E+10	0.12	1.1
305	17.8	0.0439	3.75E+11	1.94	1.6
306	12.8	0.0613	5.22E+10	0.0991	1.1
309	14.3	0.0628	2.27E+10	0.0401	0.6
310	20	0.0377	8.62E+09	0.0704	0.6
312	10.7	0.0797	6.83E+11	0.59	1.7
318	11.7	0.0699	8.27E+09	0.0106	0.5
321	11.8	0.064	3.15E+10	0.0526	0.9
322	16.7	0.0465	4.37E+10	0.19	1.0
323	9.9	0.079	2.57E+10	0.0228	0.9
324	8.37	0.0962	3.54E+10	0.0174	0.9
325	12.8	0.0647	1.86E+11	0.3	1.4
326	10.8	0.0719	2.74E+10	0.0323	0.9
328	11.8	0.0763	1.12E+11	0.11	1.0
329	12.8	0.0659	3.47E+10	0.0531	0.9
330	11.6	0.0691	1.06E+11	0.14	1.4
331	12.4	0.0623	2.04E+11	0.37	1.4
332	12.9	0.0593	8.63E+11	1.81	1.8
333	8.84	0.0854	8.54E+09	0.006	0.6
336	14.2	0.0568	1.49E+10	0.0355	0.6
338	12.8	0.0612	1.23E+10	0.0235	0.6
339	7.78	0.0981	2.40E+10	0.0111	0.8
342	8.46	0.0901	2.51E+11	0.15	1.5
345	9.35	0.0953	4.21E+10	0.0213	0.9
346	15.1	0.0501	1.39E+10	0.0485	0.7
348	6.64	0.1699	1.66E+11	0.0148	1.0

350	12.4	0.0662	4.11E+10	0.062	0.9
351	13.4	0.0617	3.52E+10	0.0656	0.8
352	9.4	0.0879	4.22E+10	0.0272	0.9
353	14.2	0.0587	5.55E+10	0.12	1.0
357	14.6	0.0574	2.37E+10	0.0548	0.8
359	17.8	0.0469	3.54E+10	0.15	0.9
361	11.8	0.079	9.02E+10	0.08	1.0
363	13.8	0.0641	5.86E+10	0.0974	0.9
364	6.49	0.1259	1.96E+12	0.43	2.0
365	9.9	0.0766	4.09E+10	0.0398	1.0
366	9.53	0.0802	6.96E+10	0.059	1.1
367	11	0.0711	5.66E+10	0.0689	1.1
368	7.79	0.1019	3.31E+12	1.37	2.2
369	13	0.0539	5.51E+11	1.54	1.3
371	5.33	0.146	6.33E+12	0.89	2.4
372	8.73	0.0909	6.01E+11	0.35	1.7
374	12.2	0.0653	5.03E+11	0.79	1.6
375	14.6	0.0553	8.74E+11	2.26	1.8
378	13.2	0.0682	2.10E+11	0.29	1.3
380	8.54	0.1052	1.06E+11	0.0399	1.0
382	5.15	0.1522	1.65E+11	0.0205	1.3
383	6.73	0.1353	1.39E+11	0.0246	0.9
384	16	0.0567	2.05E+10	0.0493	0.7
385	5.34	0.1422	6.11E+10	0.0093	1.1
386	13	0.0695	1.11E+10	0.0145	0.4
389	10.3	0.0819	1.37E+10	0.0109	0.6
390	13	0.0649	3.30E+10	0.0528	0.8
392	15.2	0.0537	8.92E+09	0.0252	0.5
394	11.7	0.0654	1.34E+11	0.21	1.3
395	14.8	0.0539	1.43E+11	0.4	1.3
396	9.4	0.1015	1.34E+11	0.056	1.1
397	12.9	0.0632	1.33E+11	0.23	1.3
398	13.8	0.0554	1.09E+11	0.28	1.3
399	14.8	0.0513	9.57E+10	0.31	1.2
400	11.1	0.07	5.96E+11	0.76	1.7
401	10.5	0.127	6.55E+11	0.14	1.2
402	13.1	0.0627	1.30E+11	0.23	1.2
403	12.6	0.0616	1.07E+11	0.2	1.2
404	15.2	0.0511	2.56E+11	0.84	1.4
405	10.2	0.0738	7.54E+10	0.0821	1.2
406	12.6	0.0601	3.37E+10	0.0679	0.9
407	13.7	0.062	6.70E+11	1.23	1.6
409	15.4	0.0541	1.86E+10	0.0513	0.7
410	6.55	0.1152	3.46E+10	0.0099	0.9
411	14.9	0.0556	9.04E+10	0.23	1.1
412	12.9	0.0601	4.57E+10	0.0922	0.9
413	11.4	0.0669	4.12E+10	0.0602	1.0
414	10.7	0.0706	5.53E+10	0.0687	1.1
417	12.4	0.0612	3.95E+10	0.0754	1.0
418	12.8	0.0599	4.22E+09	0.0086	0.3
420	20	0.0377	9.97E+09	0.0814	0.6
423	10.1	0.0759	1.07E+10	0.0107	0.6
424	11.8	0.0668	7.90E+09	0.0116	0.5
425	8.88	0.0861	2.55E+10	0.0175	0.8
426	9.41	0.0838	2.15E+11	0.16	1.4
427	7.02	0.1097	1.36E+10	0.0045	0.7
428	11.3	0.0672	9.02E+10	0.13	1.2
430	13.6	0.0662	2.18E+10	0.0329	0.6

431	14.8	0.0519	2.20E+11	0.69	1.4
432	13.2	0.0675	3.73E+10	0.0531	0.9
433	5.57	0.1379	2.10E+10	0.0035	0.8
434	11.1	0.0684	2.41E+11	0.33	1.5
435	13.1	0.067	1.10E+11	0.16	1.1
436	5.18	0.1507	2.97E+10	0.0038	0.8
437	9.65	0.083	4.14E+10	0.0317	0.9
438	17.2	0.0441	2.16E+10	0.11	0.8
439	13.6	0.0712	1.79E+10	0.0217	0.4
440	9.06	0.0841	4.02E+10	0.0296	1.0
441	14.5	0.0531	1.66E+10	0.0486	0.7
442	8.05	0.0943	4.79E+10	0.025	1.0
443	15.4	0.0533	1.52E+11	0.44	1.2
444	9.45	0.0826	1.47E+10	0.0114	0.7
446	9.39	0.0822	8.37E+10	0.0659	1.2
447	10	0.0763	2.74E+11	0.27	1.4
448	9.05	0.0845	7.01E+10	0.0508	1.1
449	11.7	0.0648	4.65E+10	0.0747	1.0
450	17	0.0445	2.62E+10	0.13	0.9
453	14.4	0.0525	2.11E+10	0.0639	0.8
455	11.8	0.0662	4.63E+10	0.0698	1.0
457	13.4	0.0567	1.92E+10	0.0462	0.8
458	8.63	0.0881	2.81E+11	0.18	1.5
459	15	0.0567	1.25E+11	0.3	1.3
460	8.58	0.0891	2.31E+10	0.0143	0.8
462	9.59	0.0805	9.78E+09	0.0082	0.5
463	10.3	0.0742	1.59E+11	0.17	1.3
465	9.23	0.1005	2.31E+11	0.0995	1.3
466	8.83	0.1013	1.19E+11	0.05	1.1
467	11.2	0.0721	5.37E+10	0.0627	1.0
468	10.8	0.0943	5.79E+10	0.0302	0.8
469	6.9	0.1219	1.04E+10	0.0025	0.5
471	10.7	0.0705	4.81E+09	0.006	0.4
472	14.5	0.056	3.04E+10	0.0758	0.7
473	12.9	0.0594	2.01E+11	0.42	1.4
474	10.4	0.0847	4.39E+10	0.0316	0.8
475	15	0.0567	1.92E+10	0.0461	0.6

476	10.8	0.0744	2.39E+10	0.0254	0.7
477	5.64	0.1367	1.11E+10	0.0019	0.6
478	13.1	0.0647	1.67E+11	0.27	1.2
484	14	0.0552	4.23E+10	0.11	1.0
486	11.8	0.081	3.16E+11	0.26	1.3
490	10.3	0.0832	1.45E+11	0.11	1.2
492	6.94	0.1159	5.52E+10	0.0155	1.1
493	6.83	0.1272	3.80E+11	0.0807	1.5
494	5.75	0.1399	6.88E+11	0.11	1.7
495	6.68	0.1177	8.12E+10	0.0218	1.2
496	5.57	0.1354	9.13E+10	0.0161	1.2
498	7.93	0.1038	2.38E+10	0.0093	0.8
499	5.3	0.1529	1.87E+11	0.0229	1.4
500	6.38	0.1319	1.47E+10	0.0028	0.7
501	6.92	0.1095	1.44E+10	0.0048	0.7
502	9.03	0.0845	5.10E+09	0.0037	0.4
503	8.96	0.0844	3.20E+10	0.0233	0.9
506	13.2	0.0592	1.75E+11	0.37	1.3
507	8.23	0.1016	1.38E+11	0.0577	1.2
508	12.3	0.0718	1.03E+12	1.22	1.7
509	10.5	0.0781	1.42E+11	0.13	1.3
510	14.7	0.0604	1.96E+11	0.39	1.3
513	8.27	0.0923	4.49E+10	0.025	1.0
514	14.7	0.0533	4.98E+11	1.44	1.7
515	5.45	0.1517	1.10E+13	1.38	2.5
517	10.9	0.0706	2.62E+12	3.26	2.1
520	13.4	0.0641	2.23E+10	0.037	0.6
522	11.7	0.0663	6.86E+11	1.03	1.8
528	15.2	0.0526	1.26E+11	0.38	1.2
547	6.52	0.1158	1.85E+10	0.0052	0.8
548	8.56	0.0899	7.36E+10	0.0443	1.2
551	9.85	0.0766	4.61E+10	0.0449	1.1
552	15	0.061	8.30E+10	0.16	1.0
553	18	0.0423	2.08E+10	0.12	0.8
567	11.7	0.0667	2.17E+11	0.32	1.5
568	12.9	0.0586	1.29E+11	0.28	1.3

## Anexo 3. Ubicación geográfica de los 70 sondeos magnetotelúricos utilizados en la inversión 3D.

N°	Nombre	Coordenadas geográficas	
		Latitud (°)	Longitud (°)
1	TV02	-112.5757722	27.5441874
2	TV04	-112.5565568	27.5198832
3	TV05	-112.5560974	27.5090473
4	TV06	-112.5464578	27.4998180
5	TV07	-112.5381878	27.4931003
6	TV08	-112.5280169	27.4821932
7	TV09	-112.5483410	27.5367634
8	TV10	-112.5523110	27.5290142
9	TV11	-112.5679933	27.5138541
10	TV12	-112.5776298	27.4928249
11	TV13	-112.5620662	27.4946573
12	TV16	-112.5378540	27.5305779
13	TV17	-112.5586131	27.5382295
14	TV18	-112.5709365	27.5272064
15	TV19	-112.5951057	27.5268254
16	TV20	-112.6021384	27.5468731
17	TV22_a	-112.6040000	27.5330000
18	TV23_a	-112.5810000	27.5310000
19	TV29_a	-112.5430000	27.5430000
20	TV31_a	-112.5333611	27.5500167
21	TV35_a	-112.5500167	27.4960000
22	TV37_a	-112.5290000	27.5060000
23	TV41	-112.5408580	27.4431242
24	TV42	-112.5241621	27.4480069
25	TV43	-112.5303396	27.4411072
26	TV44	-112.5483432	27.4759513
27	TV45	-112.5549120	27.4562801
28	TV46	-112.5223654	27.4316079
29	TV47	-112.5447526	27.4123281
30	TV48	-112.5644086	27.4499612
31	TV49	-112.5487030	27.4362353
32	TV50	-112.5589893	27.4343626
33	TV51	-112.5943362	27.4268437
34	TV52	-112.6070879	27.4286026
35	TV53	-112.5949691	27.4185119
36	TV54	-112.6168724	27.4222790
37	TV55	-112.5875572	27.4395692
38	TV56	-112.5748639	27.4297589
39	TV57	-112.5035005	27.4597962
40	TV58	-112.6495721	27.4302971
41	TV59	-112.6270549	27.4329089
42	TV60	-112.5002715	27.4794982
43	TV61	-112.5000620	27.5025462
44	TV62	-112.6295723	27.4612597
45	TV63	-112.5265491	27.5224455
46	TV65	-112.4831616	27.5279632
47	TV66	-112.4723759	27.5242734
48	TV67_a	-112.5611986	27.5290869
49	TV68	-112.6304436	27.5804062
50	TV69	-112.6194756	27.5333875
51	TV70	-112.6002074	27.5138091
52	TV71	-112.5994950	27.5018736
53	TV72	-112.6140646	27.5178003
54	TV74	-112.5795129	27.5605952
55	TV75	-112.6322058	27.5998624
56	TV76	-112.6150475	27.5925129
57	TV77	-112.5617174	27.5932443
58	TV78	-112.5831861	27.5850614
59	TV79	-112.5838819	27.5997943
60	TV80	-112.5933604	27.5956934
61	TV81	-112.5968546	27.6087719
62	TV82	-112.6190834	27.6078173
63	TV83	-112.6104981	27.5738719
64	TV84	-112.5963906	27.5679414
65	TV85	-112.6285590	27.5428939
66	TV86	-112.6183633	27.5028378
67	TV87	-112.6318633	27.4851626
68	TV88_a	-112.5881775	27.5240033
69	TV89	-112.5541087	27.4837702
70	TV90	-112.5113693	27.5120615

**Anexo 4.** Algunos mapas de distribución de resistividad para profundidades entre 0.05 y 9...km correspondientes a los Modelos I y II de la inversión 3D. Obsérvese la similitud de la distribución de la resistividad en los primeros 0.8 km.

