

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
en Ciencias de la Tierra  
con orientación en Geofísica Aplicada**

---

**Estructura del subsuelo en sectores dentro y fuera del campo  
geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S., a partir de exploración  
sísmica y gravimétrica**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Karen Lorena Casallas Moreno**

Ensenada, Baja California, México  
2019

Tesis defendida por  
**Karen Lorena Casallas Moreno**  
y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Mario González Escobar**  
Director de tesis

**Dr. Efraín Gómez Arias**

**Dr. Antonio González Fernández**

**Dra. Anamaría Escofet**



---

**Dr. Efraín Gómez Arias**  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Karen Lorena Casallas Moreno** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

**Estructura del subsuelo en sectores dentro y fuera del campo geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S., a partir de exploración sísmica y gravimétrica**

Resumen aprobado por:

---

**Dr. Mario González Escobar**  
Director de tesis

El complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV), ubicado al noreste del estado de Baja California Sur, México, está conformado por cinco estructuras volcánicas: caldera La Reforma, caldera El Aguajito y tres estratovolcanes del Plio-Cuaternario: La Virgen, El Azufre y El Viejo. Dentro del CVLTV se encuentra el campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV), el cual comenzó a producir energía eléctrica a partir de 2001 y actualmente tiene una capacidad instalada de 10 MW. El CGLTV alcanza temperaturas entre los 250 a 275°C, por lo que es considerado como uno de los campos geotérmicos más importantes del país. En este trabajo se realizó la adquisición, procesamiento e interpretación de datos sísmicos (de fuente controlada) y gravimétricos, con el objetivo de determinar las características geológico-estructurales en sectores dentro y fuera del CGLTV e identificar áreas de oportunidad geotérmica. Se tomaron dos perfiles de sísmica de reflexión dentro del campo geotérmico de 6.5 km y 1.1 km de longitud, en los que se interpretaron dos secuencias de sismorelectores, relacionadas con el Grupo Complejo Volcánico y la Formación Santa Lucía, las cuales son cortadas por un amplio sistema de fallas. En el perfil de 6.5 km, se aplicó el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, por sus siglas en inglés), con el que se definió la distribución de dos secuencias sismoestratigráficas en los primeros 60 m de profundidad. Las secuencias sísmicas fueron correlacionadas con las columnas litológicas de pozos perforados en el campo. Por otra parte, se adquirieron 223 estaciones gravimétricas dentro y fuera del CGLTV, a partir de las cuales se construyeron los mapas de anomalías gravimétricas, que permitieron definir un sistema de fallas principalmente en dirección NW-SE. Adicionalmente, con base en las anomalías gravimétricas, la geología superficial y la información de las columnas de pozos, se construyeron cuatro modelos verticales bidimensionales, en los que se observa la distribución espacial de los cinco grupos estratigráficos que conforman el CVLTV y el sistema de fallas inferidas. Finalmente, con la integración de los resultados se presenta una actualización de la distribución del sistema estructural en parte del CVLTV y se proponen nuevas zonas de interés y probable extensión del potencial geotérmico.

**Palabras claves:** Campo geotérmico Las Tres Vírgenes, sistema estructural, sísmica de reflexión, MASW y gravimetría.

Abstract of the thesis presented by **Karen Lorena Casallas Moreno** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation Applied Geophysics.

**Subsurface structure in sectors inside and outside the geothermal field Las Tres Vírgenes, B.C.S., based on seismic and gravimetric exploration**

Abstract approved by:

---

**Dr. Mario González Escobar**  
Thesis Director

Las Tres Vírgenes volcanic complex (CVLTV), located northeast of the state of Baja California Sur, Mexico, is made up of five volcanic structures: La Reforma boiler, El Aguajito caldera and three Plio-Quaternary stratovolcanoes: La Virgen, El Azufre and El Viejo. Within the CVLTV is the Las Tres Vírgenes geothermal field (CGLTV), which began producing electricity from 2001 and currently has an installed capacity of 10 MW. The CGLTV reaches temperatures between 250 and 275 ° C, which is why it is considered one of the most important geothermal fields in the country. In this work, the acquisition, processing and interpretation of seismic (controlled source) and gravimetric data was carried out to determine the geological-structural characteristics in sectors inside and outside the CGLTV and identify areas of geothermal opportunity. Two reflection seismic profiles were taken within the 6.5 km and 1.1 km long geothermal field, in which two seismic reflector sequences were interpreted, related to the Grupo Complejo Volcánico and the Formación Santa Lucía, which are cut by an extensive fault system. In the 6.5 km profile, the method of multichannel surface wave analysis (MASW) was applied, with which the distribution of two seismo-stratigraphic sequences in the first 60 m depth was defined. Seismic sequences were correlated with the lithological columns of wells drilled in the field. On the other hand, 223 gravimetric stations were acquired inside and outside the CGLTV, from which the gravimetric anomaly maps were constructed, which allowed defining a fault system mainly in the NW-SE direction. Additionally, based on gravimetric anomalies, surface geology, and well column information, four two-dimensional vertical models were constructed, in which the spatial distribution of the five stratigraphic groups that make up the CVLTV and the fault system are observed. Finally, with the integration of the results, an update of the distribution of the structural system in part of the CVLTV is presented and new areas of interest and probable extension of the geothermal potential are proposed.

**Keywords:** The geothermal field Las Tres Vírgenes, structural system, reflection seismic, MASW and gravimetry

## Dedicatoria

---

*A mis padres, mi hermana y mi Dani...*

## Agradecimientos

---

**Al CICESE**, en especial a la División de Ciencias de la Tierra, por brindarme la oportunidad de formarme personal y académicamente. **A CONACYT**, por el apoyo financiero para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: 611030.

**Al Proyecto CONACYT PN2016-2188**, “Estimación y Evaluación del Potencial Geotérmico de Sistemas de Baja y Mediana Entalpía para usos Directos y Generación de Energía Eléctrica y con Tecnología de Ciclo Binario: El Caso de las calderas La Reforma y El Aguajito del Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes, Baja California Sur” (responsable técnico Dr. Efraín Gómez Arias), por el apoyo financiero para realizar la exploración sísmica y gravimétrica en la caldera El Aguajito y en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes.

**Al Dr. Mario González Escobar**, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, por toda la colaboración, apoyo, consejos, observaciones, prácticas de campo, enseñanzas y sobre todo gracias por la paciencia para guiarme en el desarrollo de ésta tesis y guiarme por el buen camino de la geofísica.

**Al Dr. Efraín Gómez Arias**, por darme la oportunidad de trabajar en su proyecto de investigación, por el apoyo fundamental y financiero, los consejos, observaciones oportunas, dedicación, por la calidez de persona y por enseñarme el gusto por la geotermia.

**Al Dr. Antonio González y la Dra. Anamaría Escofet**, por la paciencia, enseñanzas y sobre todo por tomarse el tiempo de realizar los excelentes aportes y sugerencias durante el desarrollo de ésta tesis. En especial al Dr. Antonio por permitirme participar en el crucero de exploración geotérmica de CEMIE-Geo en enero de 2019, realizado en el golfo de California.

**A los profesores de la división**, Dr. Carlos Flores, Ing. Alejandro Hinojosa, M.C. Chang, Dr. Loic y el Dr. Diego, por compartir sus conocimientos, consejos, experiencias y por las excelentes clases impartidas. En especial al Dr. Loic por darme la oportunidad de abrir nuevos caminos y al Dr. Diego por ampliar mi visión de los métodos electromagnéticos y por todos los consejos. **Al Ing. Raúl**, por todo el apoyo, paciencia, prácticas y explicaciones del manejo del equipo GPS.

**A los técnicos**, Jaimito, Enrique, Humberto, Sergio y Martin, por toda la colaboración oportuna que recibí de su parte y por lo consejos.

**Al Ingeniero Catarino, al M.C. Clemente Gallardo y al M.C. Edgar Mastache**, por el apoyo, consejos y por compartir sus conocimientos y experiencias en el área de la exploración geofísica, que me permitieron desarrollar parte de este trabajo de tesis.

**Al Ing. Aarón David Valdez Ochoa y a la Ing. Ruth Tapia Salazar** de la Residencia Tres Vírgenes por el apoyo, disposición y el permiso otorgado para realizar la exploración sísmica y gravimétrica en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes.

**A la UMA**, en especial a Cristóbal, Gilberto, Chuy, Alfredo y Diego, por el apoyo en la toma de mis datos de campo. Fue una verdadera fortuna trabajar y aprender con ustedes.

**A Peñoles**, en especial a Clemente, Cano, Beto, Mani y Martin, por las explicaciones y por compartirme sus experiencias del trabajo en campo.

**A mis padres, Yenny y Diego**, por ser personas llenas de sencillez, bondad, humildad, sabiduría y amor, gracias por el apoyo, los consejos, por enseñarme tantas cosas de la vida, por soportar la distancia y por ser siempre mi fortaleza y mi más grande felicidad. A ustedes les debo, quien soy ahora. *Los amo mucho.*

**A mi Dani**, por ser mi polo a Tierra, por brindarme tu amor, apoyo, tiempo, felicidad, por creer siempre en mí y aguantarme en los buenos y malos momentos, gracias por cada una de las aventuras que hemos emprendido juntos. Sin ti, este camino definitivamente no hubiera sido el mismo. *Te amo infinitamente. ¡We are the champions!*

**A la familia Carbajal**, por ser en efecto mi segunda familia, por sus consejos, sonrisas, apoyo y por ser tan especiales conmigo, siempre los llevo en mi corazón. *Los amo.*

**A mis amigos**, Dianis, Mey, Pau, Eleyra y Tania, por ser mis confidentes, consejeras, locas y admirables amigas, gracias por su apoyo incondicional. A Luz, Halia, Regi, Javi, Fabian, Cris, Trejo, Jorge, Kevin y demás compañeros de la división y amigos, gracias por las charlas, apoyo y por las enseñanzas tanto de geofísica como de la vida. *¡Los quiero mucho!*

***¡Muchas gracias a todos por formar parte de mi vida, espero que todos ustedes sean muy felices!***

## Tabla de contenido

---

<b>Resumen en español.....</b>	<b>ii</b>
<b>Resumen en inglés.....</b>	<b>iii</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>xvi</b>
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Área de estudio .....	2
1.2. Geología regional .....	3
1.2.1. Geología Estructural .....	4
1.2.2. Estratigrafía.....	6
1.3. Antecedentes .....	9
1.3.1. Estudios previos.....	9
1.3.2. Modelos conceptuales.....	12
1.4. Justificación .....	19
1.5. Objetivos .....	20
1.5.1. Objetivo General.....	20
1.5.2. Objetivos Particulares.....	20
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>21</b>
2.1. Método Sísmico.....	21
2.1.1. Sísmica de reflexión .....	24
2.1.2. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) .....	33
2.2. Método gravimétrico .....	43
2.2.1. Correcciones gravimétricas.....	44
2.2.2. Adquisición.....	48
2.2.3. Procesamiento .....	51
5. Generación de los mapas de anomalías gravimétricas .....	55
<b>Capítulo 3. Resultados .....</b>	<b>57</b>
3.1. Métodos Sísmicos.....	57

3.1.1. Sísmica de reflexión .....	57
3.1.1. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) .....	60
3.2. Método gravimétrico .....	66
3.2.1. Mapas de anomalías gravimétricas.....	66
3.2.2. Modelos verticales bidimensionales .....	72
<b>Capítulo 4. Discusiones .....</b>	<b>78</b>
4.1. Métodos sísmicos.....	78
4.1.1. Relación de sísmica de reflexión y el modelo magnetotelúrico propuesto por Antayhua-Vera (2017).....	78
4.1.2. Correlación del pozo El azufre y el pozo LV-2 con la estructura somera del campo geotérmico Las Tres Vírgenes .....	78
4.2. Método gravimétrico .....	83
4.2.1. Correlación de las fallas interpretadas con el método gravimétrico.....	83
4.2.2. Anomalía gravimétrica y magnética.....	85
4.2.3. Rasgos estructurales a profundidad.....	87
4.3. Áreas de oportunidad .....	89
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>	<b>92</b>
5.1. Métodos sísmicos .....	92
5.2. Método gravimétrico .....	922
5.3. Recomendaciones .....	944
<b>Literatura citada .....</b>	<b>95</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Localización del complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV). 1) Campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). 2) Volcán La Virgen. 3) Volcán El Azufre. 4) Volcán El Viejo. 5) Caldera El Aguajito. 6) Caldera La Reforma. 7) Manifestación hidrotermal Agua Agria. Modificado de Verma et al. (2006).....	2
2. Modelo de elevación digital (DEM) regional del CVLTV, en el que se representan las principales fallas, fracturas y estructuras del complejo volcánico Las Tres Vírgenes. VVr-Volcán La Virgen. VA-Volcán El Azufre. VV-Volcán El Viejo. FB-Falla Bonfil. FM-Falla Mezquital. FV-Falla La Virgen. FC-Falla Campamento. FR-Falla Reforma. FVo-Falla Volcanes. FV1-Falla El Viejo 1. FA-Falla El Azufre. FAI- Falla El Álamo. Modificado de López-Hernández et al. (1993), Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013), Antayhua-Vera (2017) y Avellán et al. (2018).....	5
3. Mapa geológico regional del CVLTV. El polígono amarillo representa la geometría del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). CP-Cerrito Prieto. AA-Manifestación hidrotermal Agua Agria. VV-Volcán El Viejo. VA-Volcán El Azufre. CB-Cerro Blanco. LoC-Loma Cuevegel. Modificado de Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).....	6
4. a) Mapa con ubicación de los pozos geotérmicos, el polígono morado presenta el campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV) VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. b). Columnas litológicas simplificadas de los pozos en metros. LV-1, LV-2, LV-4, LV-7 y LV-13D, perforados en la zona geotérmica. Modificado de Portugal et al. (2000) y Viggiano-Guerra et al. (2009).....	8
5. a) Distribución de las principales fallas del CVLTV. b) Mapa de anomalía de Bouguer completa del complejo volcánico Las Tres Vírgenes. Modificado de López-Hernández et al. (1995).....	9
6. Modelo de resistividad en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes. Modificado de Romo-Jones et al. (2000).....	10
7. Perfiles de resistividad A-A' y B-B'; los rectángulos señalan la ampliación de las zonas conductoras superficiales. C1 está relacionada con las formaciones Santa Lucía y Comondú, (Co, Co2) con posibles fuentes de calor, Co y Co1 están a 5 y 12 km de profundidad. Modificado de Romo-Jones et al. (2005).....	11
8. Modelo conceptual del CVLTV. Propuesto por López et al. (1993).....	12
9. (a) La línea y círculos de color rojo representa los datos gravimétricos, la línea y círculos de color azul representan los datos de magnetometría. (b) Modelo bidimensional planeado de la estratigrafía del campo Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por García-Estrada y González-López (1998).....	13
10. a) Modelo hidrogeológico del CVLTV. b) Mapa del CVLTV y las principales manifestaciones termales (puntos de color rojo). Propuesto por Portugal et al. (2000)...	14

11. Modelo geológico del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por Gómez et al. (2010).....	14
12. Modelo hidrogeológico del campo geotérmico Las Tres Vírgenes. Propuesto por Benton et al. (2011).....	15
13. Actualización del modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013).....	16
14. Modelo estratigráfico del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).....	16
15. Modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por Prol-Ledesma et al. (2016), modificado de Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).	17
16. Modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). (a) Modelo tectónico y representación de la sección SO-NE, (b) Modelo conceptual de la sección SO-NE, R1 y R2 son zonas resistivas; C1, ¿C2? y ¿C3? zonas conductivas; los círculos blancos son los hipocentros (2003-2013); la línea amarilla representa la transición frágil-dúctil; La flecha blanca representa el ingreso de agua de mar (Cuenca de Guaymas); las flechas en color rojo indica el acenso del flujo de calor. Propuesto por Antayhua-Vera (2017).....	18
17. Perfil geológico del CVLTV. Propuesto por Avellán et al. (2019) y modificado de Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).....	18
18. Propagación de las onda incidente, reflejada y refractada, en medios con propiedades físicas diferentes.....	22
19. Propagación de las ondas de cuerpo (P y S) y de las ondas superficiales (Rayleigh y Love). Modificado de Linares (2005).....	23
20. a) Modelo de adquisición de datos sísmicos terrestres. b) Registro de ondas sísmicas en el que se registraron tres tipos de ondas (reflejadas, refractadas y superficiales).....	24
21. Equipo de adquisición de datos sísmicos terrestres. a) Fuente GISCO ESS500. b) Sismógrafo, radio, computadora de campo y baterías.....	25
22. Perfiles de adquisición de datos de sísmica de reflexión dentro del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (polígono azul). Perfil 1 (línea quebrada amarilla) y Perfil 2 (línea fucsia). VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre.....	26
23. Secuencia del procesado de sísmica de reflexión. Propuesto por Yilmaz (2001).....	27
24. Análisis del ground roll.....	28
25. Filtro FK.....	30

26. Representación del CMP, punto medio común.....	30
27. Análisis de velocidad, técnica de espectro de semblanza, los tonos de color negro representan los valores de semblanza más altos y son los que corrigen el efecto de NMO.....	32
28. Modelo de velocidades creado a partir del análisis de velocidades.....	32
29. Velocidad de fase (V) para distintas longitudes de ondas ( $\lambda$ ) en un semiespacio homogéneo (a) y en un medio estratificado (b). Modificado de Humire Guarachi et al. (2015). .....	35
30. Curvas de dispersión en las que se identifican los modos fundamentales y superiores para una frecuencia de 5 Hz y 20 Hz. Modificado de Humire Guarachi et al. (2015).....	35
31. Curva de dispersión, en la que se puede observar la separación del modo fundamental y los modos superiores de la onda Raleigh.....	37
32. Edición de trazas y asignación de geometría. a). Registro sísmico de la fuente ubicada a 92 m. b) Asignación de la geometría, los círculos azules indican la posición de las fuentes y los círculos amarillos la posición de los geófonos.....	40
33. Curvas de dispersión. a) Grupo de curvas de dispersión de frecuencia de 5 a 30 Hz. b) Separación de los modos fundamentales, superiores y del ruido en las curvas de dispersión. Modificado de Hayashi (2003).....	41
34. Conjunto de modelos iniciales de velocidades de la onda S, generados a partir de las curvas de dispersión.....	42
35. Perfil 2D de la distribución de la velocidad de la onda S, de la línea 9 de MASW. Las velocidades de la onda S más baja está representadas por el color azul y las velocidades más altas por los colores rojos y fucsia.....	42
36. Equipos de medición de datos gravimétricos. a) Gravímetro: Scintrex Autograv CG-5. b) Equipo GPS: Topcon GR-5.....	49
37. Estaciones gravimétricas dentro y en la parte norte del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Círculos rojos -Zona 1. Círculos azules-Zona 2. Círculos verdes-Estaciones gravimétricas eliminadas. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. AA. Manifestación Agua Agría.....	51
38. Malla usada para calcular el valor de la corrección topográfica en el punto central, propuesta por Kane (1962) y Nagy (1966). Modificado de Geosoft Oasis Montaj (2010)	52
39. Prisma para la zona cercana de la corrección topográfica con el método por Kane (1962) y Nagy (1966). Modificado de Geosoft Oasis Montaj (2010).....	53

40. Prisma para la zona intermedia de la corrección topográfica con el método por Kane (1962) y Nagy (1966). Modificado de Geosoft Oasis Montaj (2010).....	53
41. Prisma de la zona lejana para la corrección lejana de la corrección topográfica con el método por Kane (1962) y Nagy (1966). Modificado de Geosoft Oasis Montaj (2010)....	54
42. Perfil sísmico de reflexión 1. Las líneas amarillas representan las posibles fallas interpretadas; la línea punteada negra indica el cambio de amplitudes altas y bajas, correspondientes a las secuencias C1 y C2, respectivamente.....	59
43. Perfil sísmico de reflexión 2. Las líneas amarillas representan las posibles fallas interpretadas; la línea punteada negra indica el cambio de amplitudes altas y bajas, correspondientes a las secuencias C1 y C2, respectivamente.....	59
44. a) Mapa del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV) en el que se representa: las 11 líneas en las que se dividió el perfil 1 de sísmica, la ubicación de los pozos y geometría del campo geotérmico, el punto rojo indica la ubicación del pozo somero El Azufre y el azul la ubicación del pozo LV-2. b) Mapa geológico superficial del área de estudio y ubicación de las principales fallas que cortan el perfil 1. Dfe: Flujo de escombros. DLDP: Depósitos de Lava Dacíticos La Puerta. DAE-V Avalancha de escombros Aguajito. IRA: Ignimbrita Riolítica Aguajito. Modificado de Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).....	60
45. Modelo 1D de la velocidad de la onda S de la línea 2, a 730 m de distancia del primer punto de medición del perfil sísmico. La zona gris indica el rango de profundidad interpretable con el método MASW. La línea roja representa la separación entre las dos secuencias interpretadas.....	61
46. Modelos de la velocidad superficial 2D, de las 11 líneas en las que se divide en perfil 1 de MASW, la escala de colores es relativa con respecto a cada uno de los modelos. Los recuadros azules representan las anomalías de alta velocidad en el subsuelo, relacionados con los cambios de las propiedades físicas del subsuelo.....	63
47. Superior. Elevación topográfica del perfil 1. Inferior. Modelo 2D completo de la velocidad de la onda S del perfil 1 de MASW. Los recuadros en rojo representan las anomalías de alta velocidad relacionados con los cambios de las propiedades físicas del subsuelo.....	64
48. a) Mapa de anomalía de Bouguer completa (ABC), ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). b) Interpretación del mapa ABC, Z1 a Z9, representan estructuras geológicas, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F1 a F4), las líneas negras segmentadas indican cambios abruptos de la anomalía. Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.....	68

49. a) Mapa de anomalía residual, ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). b) Interpretación del mapa de anomalía residual, Z1 a Z9, representan estructuras geológicas, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F2 a F4). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel..... 69
50. a) Mapa de gradiente horizontal, ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). b) Interpretación del mapa de gradiente horizontal, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F1 a F6). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel..... 70
51. a) Mapa de la primera derivada vertical, ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). b) Interpretación del mapa de la primera derivada vertical, Z2 a Z9, representan estructuras geológicas, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F1 a F6). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel..... 71
52. a) Mapa de la segunda derivada vertical, ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). b) Interpretación del mapa de la segunda derivada vertical, Z1 a Z9, representan estructuras geológicas, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F1 a F6). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel..... 72
53. Ubicación de los modelos verticales bidimensionales. P1-Modelo 1. P2-Modelo 2. P3-Modelo 3. P4-Modelo 4. El polígono azul indica la geometría del campo geotérmico Las Tres Vírgenes, CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel..... 73
54. Superior. Comparación entre la anomalía gravimétrica observada (puntos negros) y la calculada (línea negra) y el grado de error del ajuste. Inferior. Modelo bidimensional 1 en dirección SW-NE, ubicado dentro del CGLTV y es controlado con la información de las columnas litológicas de los pozos LV-13D y LV-4 de la CFE (Generación VI) y la geología superficial propuesta por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Se observa la distribución de las principales estructuras geológicas. F2 y F6 son fallas interpretadas..... 74

55. Superior. Comparación entre la anomalía gravimétrica observada (puntos negros) y la calculada (línea negra) y el grado de error del ajuste. Inferior. Modelo bidimensional 2, en dirección NW-SE, ubicado dentro del CGLTV y es controlado con la información de las columnas litológicas de los pozos LV-13D y LV-7 de la CFE (Generación VI) y la geología superficial propuesta por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Se observa la distribución de las principales estructuras geológicas. F2, F6 y F7 son fallas interpretadas..... 75
56. Superior. Comparación entre la anomalía gravimétrica observada (puntos negros) y la calculada (línea negra) y el grado de error del ajuste. Inferior. Modelo bidimensional 3, en dirección SE-NW, ubicado dentro y fuera del CGLTV y es controlado con la información de las columnas litológicas de los pozos LV-7, LV-1 y LV-2 de la CFE (Generación VI) y la geología superficial propuesta por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Se observa la distribución de las principales estructuras geológicas. F1 y F7 son fallas interpretadas..... 76
57. Superior. Comparación entre la anomalía gravimétrica observada (puntos negros) y la calculada (línea negra) y el grado de error del ajuste. Inferior. Modelo bidimensional 4, en dirección NE-SW, ubicado fuera del CGLTV y es controlado por la geología superficial propuesta por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Se observa la distribución de las principales estructuras geológicas. F1 y F4 son fallas interpretadas... 77
58. Columna litológica del pozo El Azufre, perforado dentro del CVLTV, durante la campaña de adquisición de datos geofísicos del proyecto número 2016-01-2188 del CONACYT..... 79
59. a). Modelo 1D de la velocidad de la onda S, de la línea 2 cerca del pozo El Azufre y a 730m de distancia del primer punto de medición del perfil sísmico. La zona gris indica el rango de profundidad interpretable con el método MASW. b) Modelo 2D de la velocidad de la onda S, de la línea 2, correlacionado con el pozo el Azufre. S1: Secuencia de flujo piroclásticos. S2: Secuencia de andesitas consolidadas de la formación El Azufre..... 81
60. a) Mapa tectónico local del CVLTV, sintetizado de estudios de López et al, 1993; Benton et al, 2011; Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2012, 2013. Las líneas negras representan el sistema de fallas y fracturas. Modificado de Antayhua-Vera (2017). b) Mapa de ABC, fallas del CVLTV (líneas negras) tomadas de Antayhua-Vera (2017), fallas interpretadas F1 a F6 (líneas amarillas segmentadas). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. Pozos geotérmicos (círculos blancos). Geometría del campo geotérmico (polígono gris). SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel..... 83
61. a) Mapa de señal analítica de la anomalía magnética reducido al polo continuada 1000 m hacia arriba, estaciones gravimétricas (puntos amarillos). Modificado de Avellán et al. (2018). b) Mapa de ABC, Z1 a Z9, representan estructuras geológicas interpretadas. Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos magnéticos y gravimétricos. Pozos geotérmicos (círculos blancos). Geometría del campo geotérmico (polígono gris). SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA.

Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.....	85
62. Diferentes perspectivas del modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV), construido a partir de los modelos gravimétricos, en el que se evidencia el sistema estructural en forma de graben del basamento granodiorítico y las estructuras superiores tipo horts.....	88
63. Mapa de la primera derivada vertical en el que se identifican las tres zonas propuestas de expansión del CGLTV (círculos amarillos). Zonas de expansión (ZP1, ZP2, ZP3). Las fallas interpretadas F1 a F6 (líneas amarillas segmentadas). Pozos geotérmicos (círculos blancos). Geometría del campo geotérmico (polígono azul). CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.....	89

## Lista de tablas

---

Tabla	Página
1 Parámetros de adquisición de datos sísmicos durante la campaña de exploración geofísica en el CGLTV.....	26
2 Parámetros de adquisición de datos gravimétricos.....	50
3 Valores de densidad de las rocas que conforman el CVLTV. Modificado de Telford et al. (1991).....	73
4 Clasificación de la velocidad de la onda S para diferentes tipos de material en los primeros 30 m de profundidad (IBC, 2012).....	80
5 Velocidad de la onda S para diferentes tipos de material en laboratorio (Mendoza, 2015).....	80

## Capítulo 1. Introducción

---

La demanda de energía eléctrica a nivel mundial ha aumentado considerablemente y con ella, el uso de combustibles fósiles y los niveles de contaminación, lo que ha incentivado al gobierno, el sector privado y los centros de investigación a buscar nuevas formas de generarla. Por lo anterior y con el objetivo de que esta energía fuera de fuente natural, rentable, eficiente y amigable con el medio ambiente; se ha fomentado el uso de las energías renovables (eólica, solar, biomasa, geotérmica, entre otras) para producir electricidad. La energía geotérmica, por su parte, es un tipo de energía renovable sostenible que se enfoca en el aprovechamiento del calor almacenado y generado en el interior de la Tierra y se destaca como una de las fuentes generadoras de energía que menos produce contaminación (Gutiérrez-Negrín, 2015).

La primera central geotérmica comercial en el mundo se construyó 1911 en Larderello, Italia y en la actualidad cerca de 24 países utilizan la energía geotérmica para producir energía eléctrica (Bertani, 2016). México por su parte operó la primera unidad geotermoeléctrica en 1959, con una capacidad instalada de 3.5 MW, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo (Hiriart Le Bert et al., 2011), actualmente el país cuenta con una capacidad instalada de 982.3 MW, lo que representa solo el 1.25% de la capacidad eléctrica del país y se estima que cuenta con un potencial geotérmico de aproximadamente 24.7 GW (Romo-Jones et al., 2018). La Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG), opera cuatro campos geotérmicos de tipo hidrotermal en México:

- 1) Cerro Prieto (Baja California), que tiene una capacidad instalada de 570 MW.
- 2) Los Azufres (Michoacán), que tiene una capacidad instalada de 247.9 MW.
- 3) Los Humeros (Puebla), que tiene una capacidad instalada de 118.9 MW.
- 4) Las Tres Vírgenes (Baja California Sur), que tiene una capacidad instalada de 10 MW.

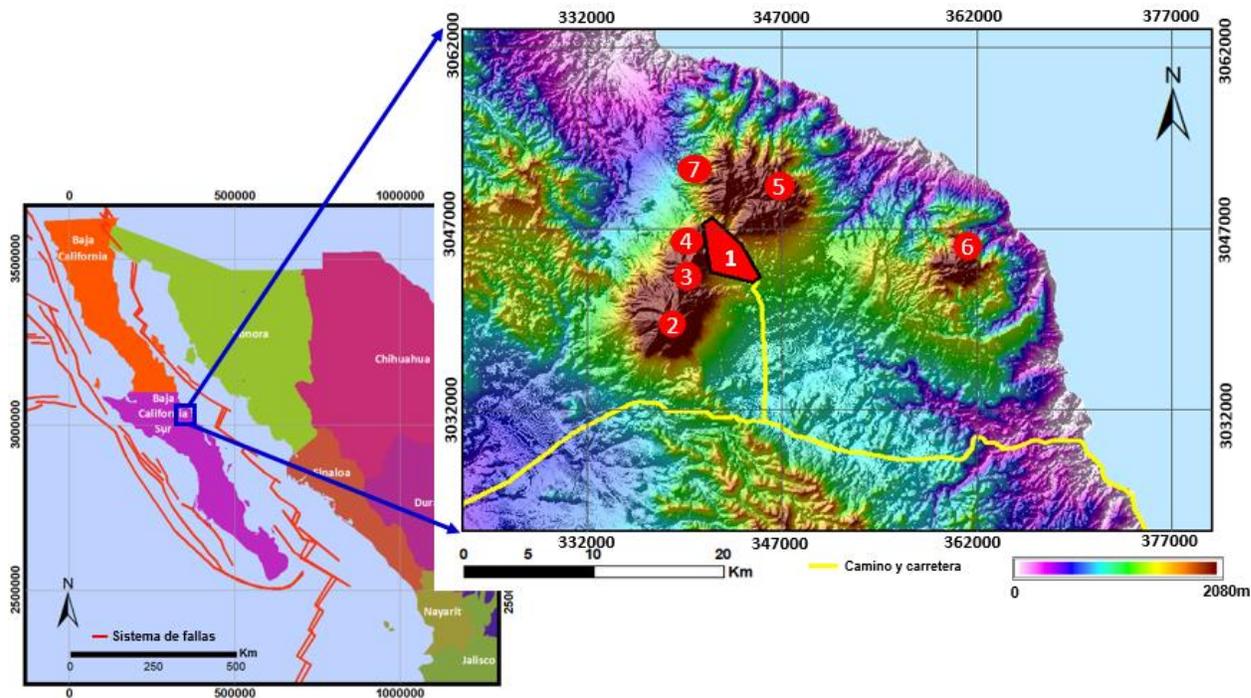
Por otra parte, la empresa privada mexicana Grupo Dragón opera el campo Domo San Pedro en Nayarit, el cual cuenta con una capacidad instalada de 35.5 MW.

La actividad hidrotermal superficial (representada por manantiales calientes y fumarolas) en el norte del estado de Baja California Sur, México, está asociada a la actividad volcánica del complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV). Esta región despertó un gran interés geotérmico por parte de la CFE y la comunidad científica (Viggiano-Guerra et al., 2009), los cuales realizaron una serie de estudios exploratorios en dicha área desde el año 1982, posteriormente se formó el campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV) y se perforó el primer pozo exploratorio LV-2 en el año 1986, operado por la CFE (Lorenzo-Pulido y Soto-

Peredo, 2013). A la fecha, se han perforado 11 pozos, de los cuales tres son productores, dos son inyectoros y los demás son exploratorios (Romo-Jones et al., 2018) y se busca incentivar el desarrollo de trabajos de exploración geológica, geofísica y geoquímica dentro del CVLTV, para identificar más áreas de oportunidad con potencial geotérmico, que permita expandir la capacidad actual.

### 1.1. Área de estudio

El CVLTV está localizado en el margen oriental de la porción noreste del estado de Baja California Sur, México (Figura 1), en el municipio de Mulegé, a 35 km al noroeste del Puerto de Santa Rosalía y 36 km del oasis de San Ignacio, entre las coordenadas 27°20'N a 27°40'N y -112°20'W a -112°40'W y dentro de la reserva de la biosfera El Vizcaíno. El complejo está localizado en un área tectónicamente activa, en la que se evidencian una serie de manifestaciones termales relacionadas con la actividad volcánica reciente. Las principales estructuras volcánicas de esta zona son las calderas La Reforma y El Aguajito y el sistema de volcanes La Virgen, El Azufre y El Viejo (Verma et al., 2006).



**Figura 1.** Localización del complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV). **1)** Campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). **2)** Volcán La Virgen. **3)** Volcán El Azufre. **4)** Volcán El Viejo. **5)** Caldera El Aguajito. **6)** Caldera La Reforma. **7)** Manifestación hidrotermal Agua Agria. Modificado de Verma et al. (2006).

Dentro de esta región se localiza el CGLTV, el cual tiene una extensión de aproximadamente 90 km<sup>2</sup> (Barragán et al., 2010). La fuente de calor del sistema proviene de las cámaras magmáticas del CVLTV a profundidades entre los 5 y 10 km, determinadas por la zona de transición frágil-dúctil (Verma et al., 2006). Los fluidos del yacimiento geotérmico se encuentran en las fallas y fracturas del basamento granodiorítico del Cretácico debajo de las rocas volcánicas del Cuaternario a una profundidad entre los 900 a 1500 m (Flores-Armenta et al., 2014), un grupo de areniscas funcionan como capa sello del yacimiento. El agua geotérmica de los pozos de producción es de tipo clorurada sódica (Portugal et al., 2000), el yacimiento es de tipo líquido dominante y alcanza temperaturas entre los 250 a 275°C. En el CVLTV está dominado por la permeabilidad secundaria la cual está asociada con las fallas NW-SE y N-S, con valores entre los 0.3 a 3.0 mD, lo que permite el movimiento de los fluidos geotérmicos, mientras que la porosidad efectiva promedio se ha reportado entre 0.4 a 5% (Prol-Ledesma et al., 2016).

## 1.2. Geología regional

El CVLTV se encuentra en una zona tectónicamente activa, en el dominio transtensional del sistema de fallas laterales derechas que dieron paso a la separación de la península de Baja California del occidente de México y a la formación del Golfo de California (Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2012). Está formado principalmente por las estructuras caldéricas La Reforma y El Aguajito, en la parte este del complejo y por tres estructuras volcánicas del Plio-Cuaternario, El Viejo, El Azufre y La Virgen, emplazados en ese orden a lo largo de un sistema de fallas NW-SE, esta alineación se alimentó de fisuras que marcan la huella meridional de la Falla Cimarrón lateral izquierda (Figura 2) (Avellán et al., 2018).

La caldera La Reforma fue la primera estructura en emerger de las aguas del Golfo de California; se trata de una estructura de 10 km de diámetro de carácter riolítico-basáltico cuya actividad volcánica comenzó hace 3.5 Ma y cesó hace 0.8 Ma (López-Hernández et al., 1995). Fue el resultado de la emisión de enormes flujos piroclásticos, un núcleo andesítico, seguido de tobas riolíticas, domos y cenizas volcánicas. Estudios de monitoreo sísmico realizados en la caldera ubican una disminución de sismicidad entre los 7 y 8 km de profundidad, la cual estaría relacionada con la zona de transición frágil-dúctil (Pérez, 2017). La caldera El Aguajito por su parte es de tipo dacítica-riolítica (Romo-Jones et al., 2000) y tuvo una gran actividad volcánica entre los 0.7 a 0.45 Ma, edades determinadas por dataciones de K/Ar de algunos productos volcánicos del complejo (Garduño-Monroy et al., 1993). Posteriormente debido a una serie de esfuerzos regionales se originó el sistema de fallas normales N-S denominados la falla Cimarrón, que divide la

estructura en dos partes. La caldera El Aguajito y La Reforma se encuentran separadas por el cañón El Álamo que tiene un desnivel de más de 200 m de profundidad (Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2013).

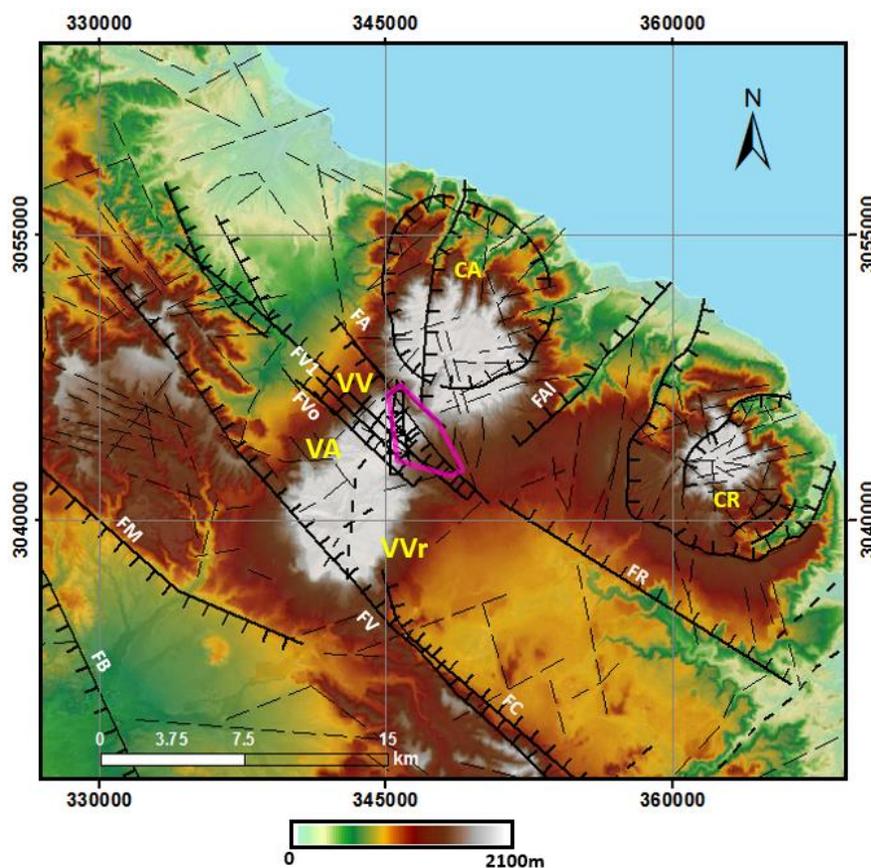
El volcán El Viejo se encuentra en la parte norte del centro volcánico, fue el primero en emplazarse hace 0.3 Ma, mediante la extrusión de varios domos y lavas dacíticas y andesíticas; el flanco norte de este volcán colapsó produciendo una avalancha de escombros hacia el cañón El Azufre. Posteriormente la actividad volcánica migró hacia el sur-suroeste hace 0.173 Ma formando el aparato volcánico de composición dacítica llamado El Azufre (3.8 km<sup>2</sup>), la actividad del volcán finalizó hace 0.128 Ma. Finalmente la actividad eruptiva migró hacia el sur hace 0.112 Ma y comenzó la formación del volcán La Virgen, se construyó a partir de la efusión de domos y lavas basáltico-andesíticas a dacíticas y continúa activo. Sus últimas erupciones registradas fueron en los años 1746 y 1857 (López-Hernández et al., 1995). Los tres aparatos volcánicos del CVLTV se originaron por cámaras magmáticas de composición riolítica (Gutiérrez-Negrín, 2015; Avellán et al., 2018).

### **1.2.1. Geología estructural**

Regionalmente el CVLTV se ve afectado por dos etapas de deformación, las cuales están relacionadas con la apertura del Golfo de California durante el Mioceno Medio (~12 Ma). La primera etapa ocurrió a finales del Mioceno hace 10 Ma, debido a esfuerzos distensivos en dirección NE-SW que produjeron fallas en su mayoría de tipo normal con dirección NW-SE, dando paso a la formación de la cuenca de Santa Rosalía (Garduño-Monroy et al., 1993). La segunda etapa de deformación ocurrió en el Plioceno debido a un cambio en la dirección de los esfuerzos, de una extensión en dirección NE-SW pasó a W-E, produciendo fallas en dirección N-S, los sistemas de fallas NE-SW y N-S ocasionaron zonas de debilidad y en el Cuaternario formaron y reactivaron el sistema tectónico NE-SW (Figura 2) (Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo, 2013; Prol-Ledesma et al., 2016).

El sistema de fallas NW-SE que afecta el CVLTV está formado principalmente por las fallas El Azufre, El Volcán, Mezquital, El Campamento, El Viejo 1, El Viejo 2, Reforma y El Partido y se encuentran relacionados con la formación de la cuenca Santa Rosalía. Tanto la falla El Volcán como El Viejo 1 y principalmente la falla El Viejo 2, son fallas activas, de alta permeabilidad, de espesor de fracturamiento de 80 a 90 m, a través de las cuales se obtiene parte de la producción de vapor del CGLTV (Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo, 2013). La falla el Azufre corre a lo largo de la depresión topográfica entre el volcán El Viejo al SW y la

caldera El Aguajito al NE, es altamente permeable y se asocia con una zona en la que hay un alto índice de fluidos geotérmicos. Las fallas superficiales El Campamento y Mezquital son fallas normales de componente lateral derecho y con una caída vertical de 200 m y 150 m respectivamente; se encuentran afectando al basamento (Avellán et al., 2018), son fallas semiparalelas a la costa del Golfo de California. La Falla de Bonfil también de dirección NW-SE, es una falla activa lateral derecha con dirección N25°W, la cual tiene una longitud de 25 km (Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2013). La falla Reforma es de tipo lateral derecho, en algunas zonas se encuentra sepultada por sedimentos volcánicos y sedimentarios.



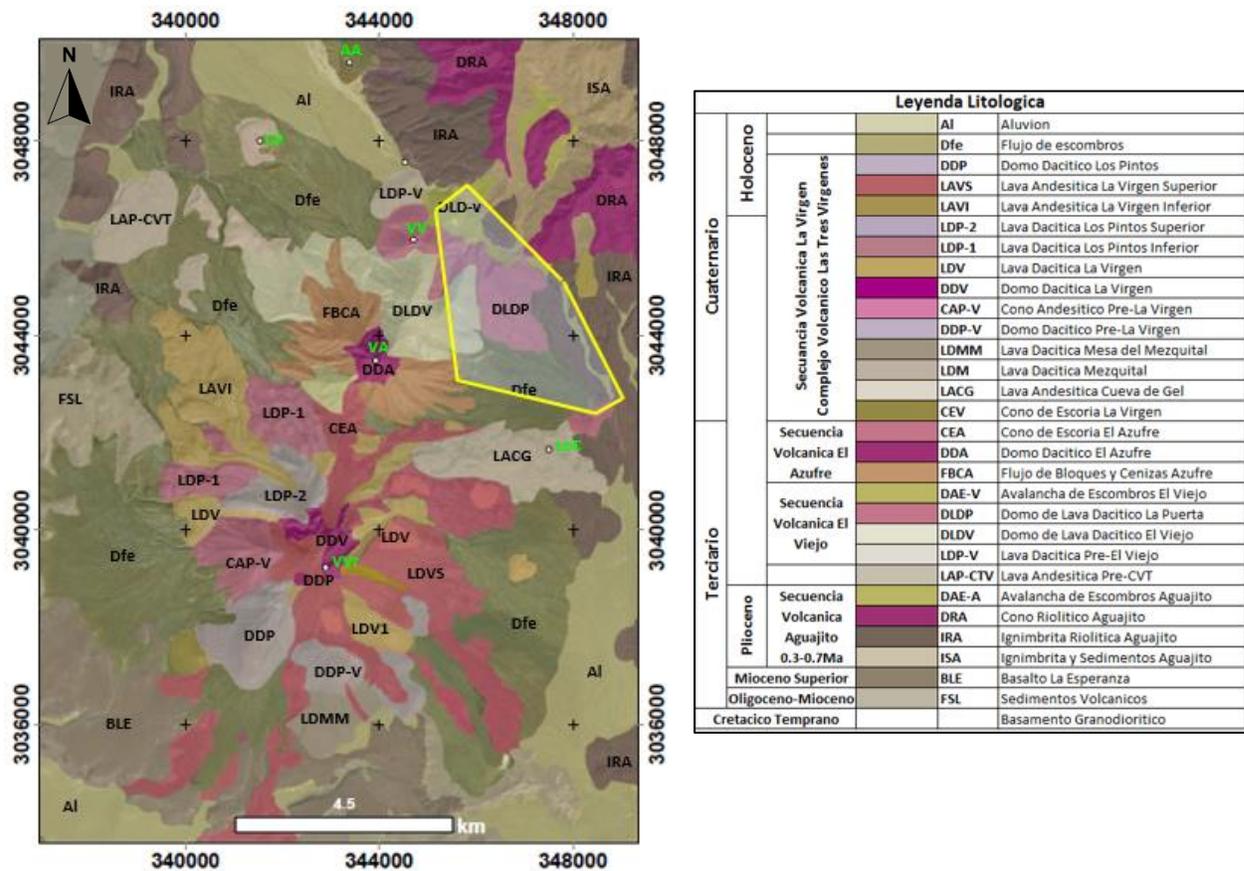
**Figura 2.** Modelo de elevación digital (DEM) regional del CVLTV, en el que se representan las principales fallas, fracturas y estructuras del complejo volcánico Las Tres Vírgenes. VVr-Volcán La Virgen. VA-Volcán El Azufre. VV-Volcán El Viejo. FB-Falla Bonfil. FM-Falla Mezquital. FV-Falla La Virgen. FC-Falla Campamento. FR-Falla Reforma. FVo-Falla Volcanes. FV1-Falla El Viejo 1. FA-Falla El Azufre. FAI- Falla El Álamo. Modificado de López-Hernández et al. (1993), Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013), Antayhua-Vera (2017) y Avellán et al. (2018).

El sistema de fallas N-S, NE-SW está formado principalmente por las fallas El Aguajito, El Colapso, Las Víboras y Cimarrón; la falla Las Víboras, tiene un espesor que varía de 68 – 230 m, es conductora de fluidos, altamente permeable y junto con la falla El Colapso (la cual tiene un espesor de fracturamiento que varía de 30 a 50 m) se registran como fallas activas hidrotermales del CVLTV (Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo,

2013). La falla Cimarrón es una falla normal que corta la caldera El Aguajito y controla el drenaje a profundidad, es segmentada por el cañón El Azufre, se considera que continua hacia el SE controlando el emplazamiento del complejo volcánico; es una falla activa hidrotermalmente, de alto ángulo y buzante hacia el W (Venegas-Salgado et al., 2006; Lorenzo Pulido y Soto Peredo, 2013; Avellán et al., 2018).

### 1.2.2. Estratigrafía

La secuencia de eventos tectónicos, volcánicos y sedimentarios dieron paso a la conformación del CVLTV a finales del Cretácico, en el momento en el que ocurrió el emplazamiento del batolito de California. En la Figura 3, se muestra el mapa geológico-estratigráfico superficial del CVLTV, editado de la publicación realizada por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2013.

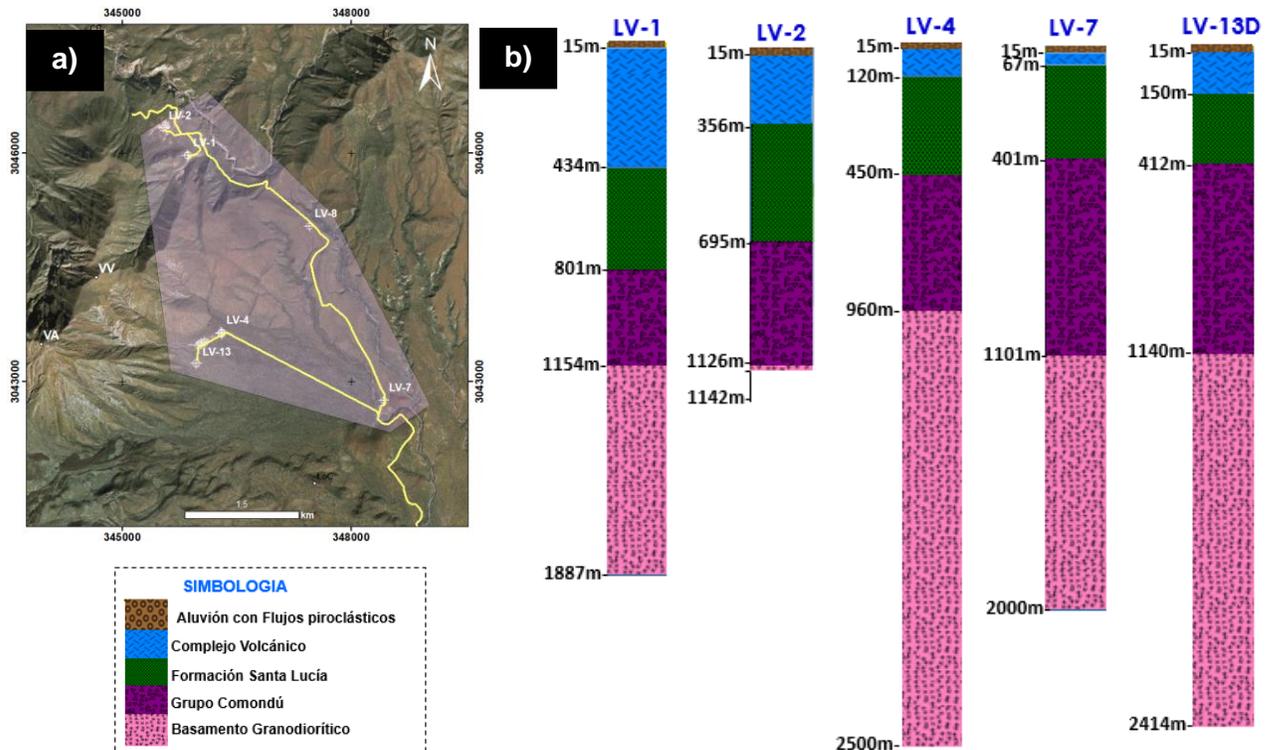


**Figura 3.** Mapa geológico regional del CVLTV. El polígono amarillo representa la geometría del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). CP-Cerrito Prieto. AA-Manifestación hidrotermal Agua Agria. VV-Volcán El Viejo. VA-Volcán El Azufre. CB-Cerro Blanco. LoC-Loma Cuevegel. Modificado de Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).

La secuencia estratigráfica del CVLTV está formada principalmente por: 1) Basamento granodiorítico, 2) Grupo Comondú, 3) Formación Santa Lucía, 4) Grupo del Complejo Volcánico y 5) Capa superficial de aluvi3n. A continuaci3n, se hace una breve descripci3n de cada una de ellas:

- 1)** La unidad litol3gica m3s antigua del CVLTV es el basamento. Se trata de una intrusi3n granodiorítica con cristales de plagioclasas y cuarzo e incrustaciones de biotita y hornablenda del Cret3cico Superior ( $99.1 \pm 0.8$  Ma), el cual no aflora en la zona geot3rmica, pero ha sido encontrado por pozos exploratorios a profundidades entre los 900 a 1500 m (Romo Jones et al., 2000; Viggiano Guerra et al., 2009; Macías-V3zquez y Jim3nez-Salgado, 2013).
- 2)** Sobre la intrusi3n granodiorítica se encuentra el Grupo Comondú, un grupo de rocas vulcano-sedimentarias del Mioceno de espesor entre 750 y 1500 m, se trata de una secuencia de arenisca, brechas, conglomerado y tobas riolíticas con lahares andesíticos (Fletcher et al., 2007).
- 3)** La Formaci3n Santa Lucía del Mioceno ( $21.59 \pm 0.29$  Ma), se sobrepone al Grupo Comondú y se encuentra a una profundidad media entre los 300 y 690 m, tiene un espesor variable entre 140 a 360 m (Avell3n et al., 2018), est3 conformada por andesitas, basaltos y lahares andesíticos, en la parte norte tambi3n se compone de conglomerado (L3pez-Hern3ndez et al., 1995).
- 4)** Sobreyaciendo a la Formaci3n Santa Lucía se encuentra el Grupo Complejo Volc3nico del Plioceno Medio a Tardío, de espesores promedio de 300 m, el cual est3 conformado principalmente por la Formaci3n de la cuenca de Santa Rosalía, que incluye las Formaciones El Boleo, La Gloria y El Infierno, se trata de una secuencia sedimentaria de areniscas marinas y conglomerados continentales que se formaron durante la separaci3n de la península de Baja California (Wong-Ortega, 2000). En la parte superior del grupo est3 formado de productos volc3nicos asociados a las calderas, las dacitas El Viejo (Qdv) y a la formaci3n andesita El Azufre, con variaci3n de andesita basáltica.
- 5)** En la parte somera del CVLTV, a profundidades menores a los 15 a 50 m, se encuentra la capa de aluvi3n, constituido principalmente por fragmentos pirocl3sticos angulosos de composici3n volc3nica (dacítica, andesítica, riolítica) provenientes de las estructuras volc3nicas, principalmente del volc3n El Viejo en la zona del CGLTV. El grado de compactaci3n de esta unidad litol3gica es muy bajo, lo que permite mantener los altos índices de permeabilidad.

La información estratigráfica a profundidad del CVLTV se ha confirmado con el análisis de las muestras de núcleos de los pozos perforados en la zona geotérmica. En la Figura 4, se muestran la ubicación y secuencias estratigráficas de los pozos: LV-1, LV-2, LV-4, LV-7 y LV-13D del CGLTV.



**Figura 4. a)** Mapa con ubicación de los pozos geotérmicos, el polígono morado presenta el campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV) VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. **b).** Columnas litológicas simplificadas de los pozos en metros. LV-1, LV-2, LV-4, LV-7 y LV-13D, perforados en la zona geotérmica. Modificado de Portugal et al. (2000) y Viggiano-Guerra et al. (2009).

Las manifestaciones hidrotermales superficiales dentro del CVLTV están representadas por fumarolas y manantiales de tipo ácido sulfatado, característico de zonas geotérmicas donde ocurre absorción de vapor y oxidación de  $H_2S$ . Las manifestaciones están alineadas en dirección NW-SE y alcanzan temperaturas superficiales que oscilan entre 53 y 98°C, una de las principales manifestaciones hidrotermales es Agua Agria, al norte de la caldera El Aguajito (Batista-Cruz et al., 2019). El reservorio geotérmico es de tipo líquido dominante (más de 3 partes de salmuera y 1 parte de vapor) y de origen magmático con procesos de mezcla (Gutiérrez-Negrín, 2015). La información de los núcleos de pozos indican que la permeabilidad original de las formaciones litológicas es limitada y que el sistema de circulación de los fluidos a profundidad se encuentra principalmente en los planos de fallas y fracturas (López-Hernández et al., 1995).

## 1.3. Antecedentes

### 1.3.1. Estudios previos

En 1984 se realizaron estudios de geología, geoquímica y geofísica (gravimetría, magnetometría, registros eléctricos y magnetotelúricos) por parte de la CFE (Generación VI) dentro del CVLTV. Estos resultados plantean que, las zonas de mayor interés geotérmico se ubican sobre las fallas El Azufre, La Biznaga y Las Víboras (Figura 5. a). Además, se adquirieron 389 mediciones gravimétricas con las cuales se construyó el mapa de anomalía de Bouguer del CVLTV (Figura 5. b), del cual se deduce la presencia de fallas regionales enterradas con tendencias NW-SE y NE-SW, además de la relación de las manifestaciones térmicas con valores altos de la anomalía de la gravedad, limitados por un lineamiento NW-SE el cual correspondiente a la falla El Azufre (López-Hernández et al., 1995). Además, se reportó la presencia de un cuerpo conductor (basamento granodiorítico) con valores entre los 3 y 8  $\Omega$ m a una profundidad de 1900 m y valores magnéticos mínimos relacionados con la alteración hidrotermal en el área El Azufre, La Biznaga y Las Víboras (Prol-Ledesma et al., 2016).

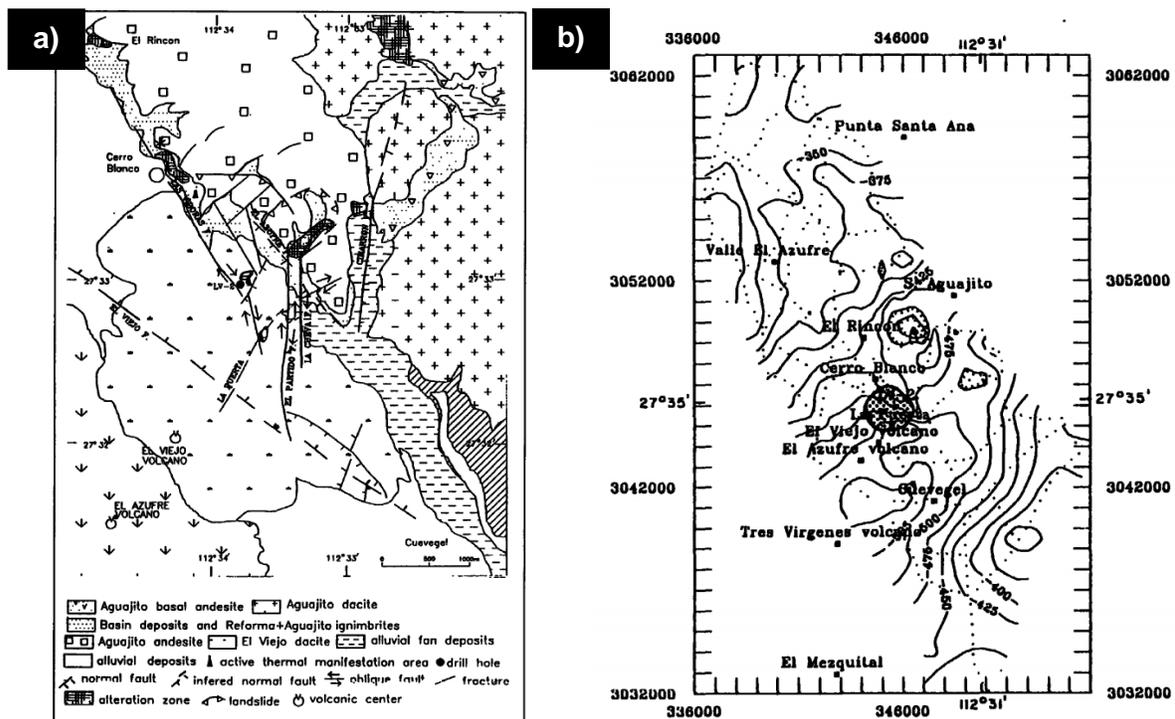
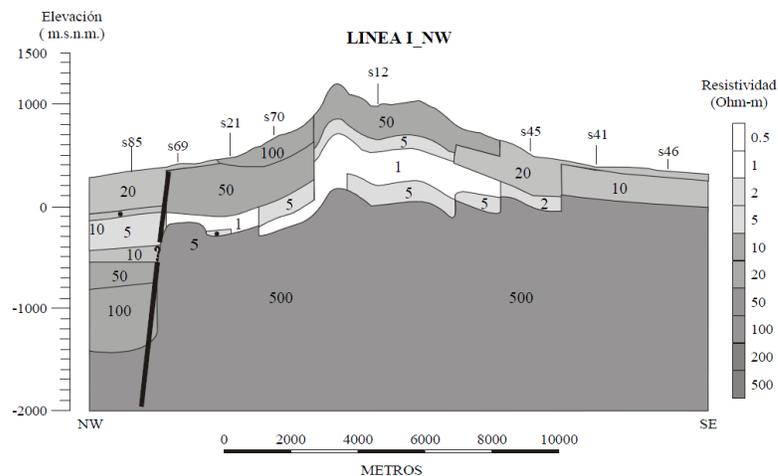


Figura 5. a) Distribución de las principales fallas del CVLTV. b) Mapa de anomalía de Bouguer completa del complejo volcánico Las Tres Vírgenes. Modificado de López-Hernández et al. (1995).

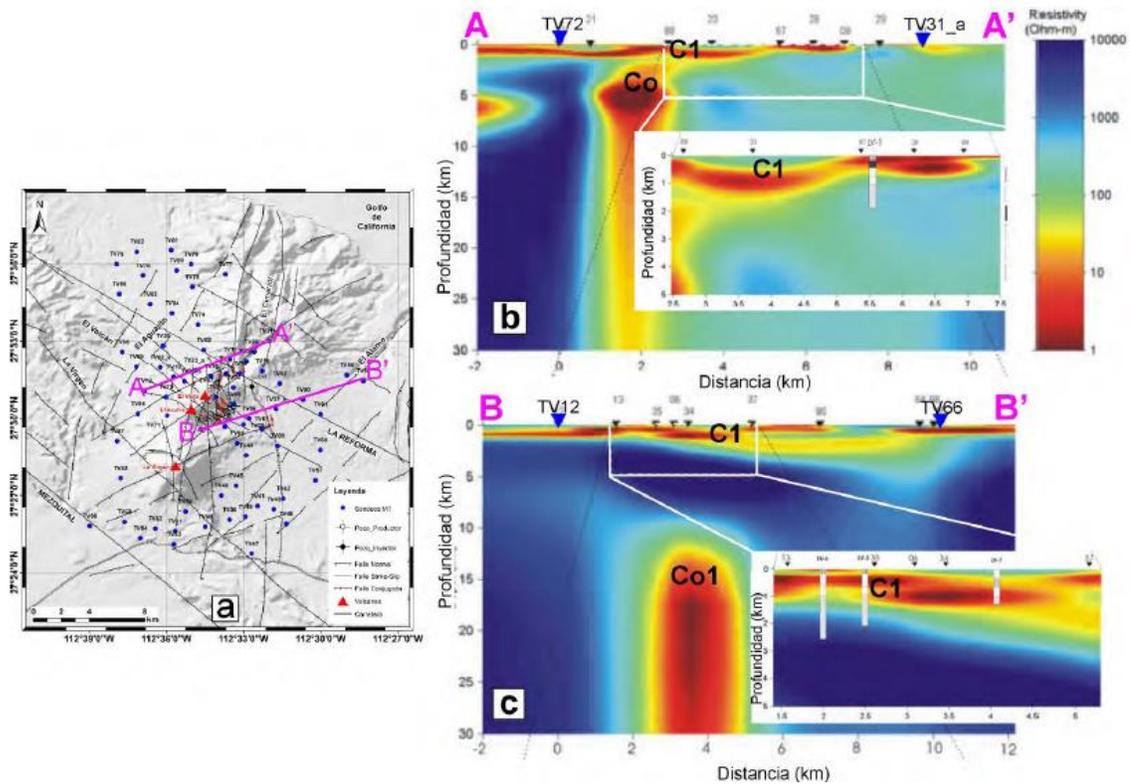
En 1992 comenzó el monitoreo de la actividad sísmica en el CGLTV con el objetivo de determinar la ocurrencia de los sismos y la caracterización del movimiento de las fallas que afectaban el campo geotérmico; Wong-Ortega (2000) encontró que la zona en la que se concentra el mayor número de eventos sísmicos se ubica en las fallas El Azufre y La Virgen a profundidades entre los 7 a 9 km y la ausencia de eventos profundos en esa zona sugieren la presencia de un cuerpo de alta temperatura a 8 km que podría relacionarse con la fuente de calor que alimenta a la región geotérmica. La mayor actividad sísmica registrada es en la caldera El Aguajito y en los aparatos volcánicos. Además, en toda la banda de frecuencias analizada, la atenuación de las ondas P fue mayor que la atenuación de las ondas S, sugiriendo que la estructura somera de la región de estudio se encuentra parcialmente saturada con fluidos. En 2004 se realizó una campaña de monitoreo sísmico en el que se concluyó que el sistema de fallas más activo era El Volcán, El Partido y El Viejo, y se propone la extensión del CGLTV hacia la falla El Volcán y El Viejo (Venegas-Salgado et al., 2006; Ortiz-Prieto y Lorenzo-Pulido, 2009).

Romo-Jones et al. (2000) mostraron los resultados obtenidos tras la realización de varias campañas geofísicas que incluyeron la toma de datos magnetotelúricos, transitorios electromagnéticos, sondeos eléctricos y el análisis de la atenuación de las ondas coda de sismos locales proporcionados por una red sísmológica (Figura 6). Concluyeron que existe una zona altamente conductora ( $<5 \text{ m}\Omega$ ) a profundidades entre 250 m y 750 m, relacionada con la Formación Santa Lucía y del Grupo Comondú. Además, se sugirió que a lo largo del Cañón El Azufre había una zona de interés geotérmico y que probablemente la falla El Azufre se encuentra cortando el basamento y a lo largo de esta falla, existen zonas en las que tanto la conductividad eléctrica como la atenuación de la onda coda son anormalmente altas a profundidades entre 250 y 2500 m. Se encuentra resistividades menores a  $5 \text{ m}\Omega$ , asociadas a las rocas fracturadas y a la presencia de fluidos con temperaturas mayores a los  $240^\circ\text{C}$ , a profundidades entre 1500 y 2500 m.



**Figura 6.** Modelo de resistividad en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes. Modificado de Romo-Jones et al. (2000).

Romo-Jones et al. (2005) realizaron estudios magnetoteléuricos del CGLTV (Figura 7), aplicando el método de funciones de respuesta serie-paralelo. Los resultados de la inversión 2D, sugieren la presencia de anomalías conductoras superficiales (C1) relacionadas con las formaciones Santa Lucía y Comondú y las anomalías profundas (Co, Co1) asociadas a posibles fuentes de calor o fluidos salinos.



**Figura 7.** Perfiles de resistividad A-A' y B-B'; los rectángulos señalan la ampliación de las zonas conductoras superficiales. C1 está relacionada con las formaciones Santa Lucía y Comondú, (Co, Co2) con posibles fuentes de calor, Co y Co1 están a 5 y 12 km de profundidad. Modificado de Romo-Jones et al. (2005).

Avellán et al. (2019) realizaron el análisis de datos aeromagnéticos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) publicados en el año 2000, con los cuales calcularon las profundidades de la fuente magnética en la región entre 1.7 y 2.4 km con respecto a la altura máxima del CVLTV. Los valores magnéticos altos están relacionados a los volcanes y las fuentes de la anomalía están separadas por una zona de debilidad, probablemente asociada a la falla El Campamento. Además, existen dos anomalías magnéticas positivas ubicadas E-SE del volcán El Azufre y E-NE del volcán La Virgen las cuales pueden estar relacionadas con las gruesas pilas de rocas máficas e intermedias en profundidad dentro del basamento, que podrían proporcionar la fuente térmica, que permite la generación de energía.

Batista-Cruz et al. (2019) realizaron la recopilación de datos químicos e isotópicos de gases a lo largo de la costa este de la península de Baja California. Encontraron valores 4.6 a 5.6 Ra para la relación  $^3\text{He}/^4\text{He}$  en la manifestación hidrotermal Agua Agria y de 4.3 Ra para la fumarola de Las Tres Vírgenes, lo que indica que los gases tienen carácter magmático y alrededor del 68% de los gases del CGLTV tienen una contribución del manto, en los que domina principalmente el  $\text{CO}_2$  por lo tanto se destaca el potencial geotérmico de la manifestación Agua Agria.

### 1.3.2. Modelos conceptuales

López et al. (1993) realizaron el primer modelo geotérmico del CGLTV (Figura 8), usando la recopilación de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos, planteando que la fuente del yacimiento geotérmico está a una profundidad de 10 km.

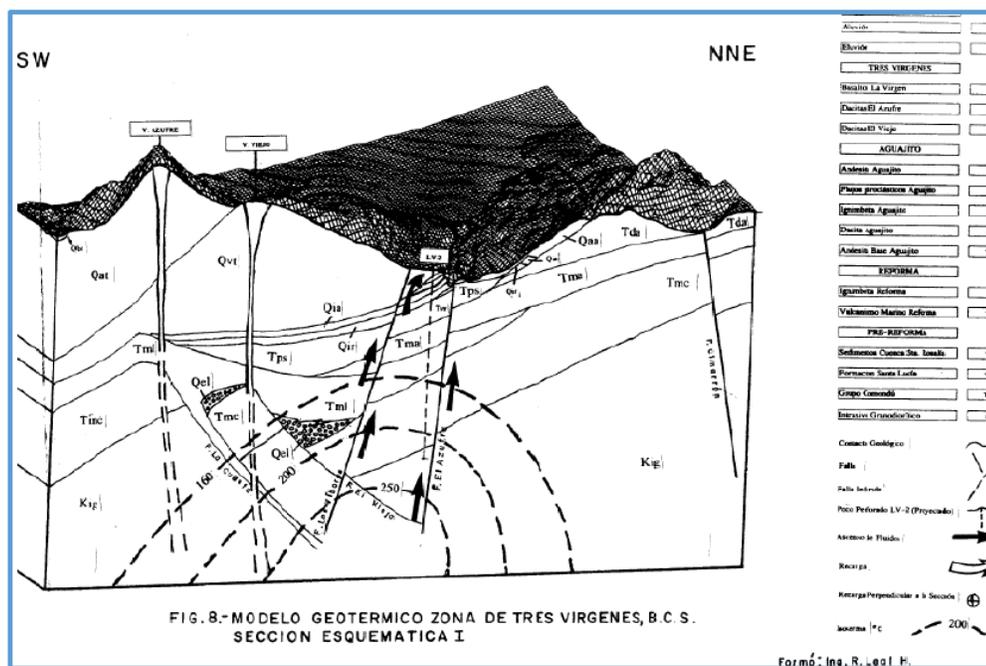
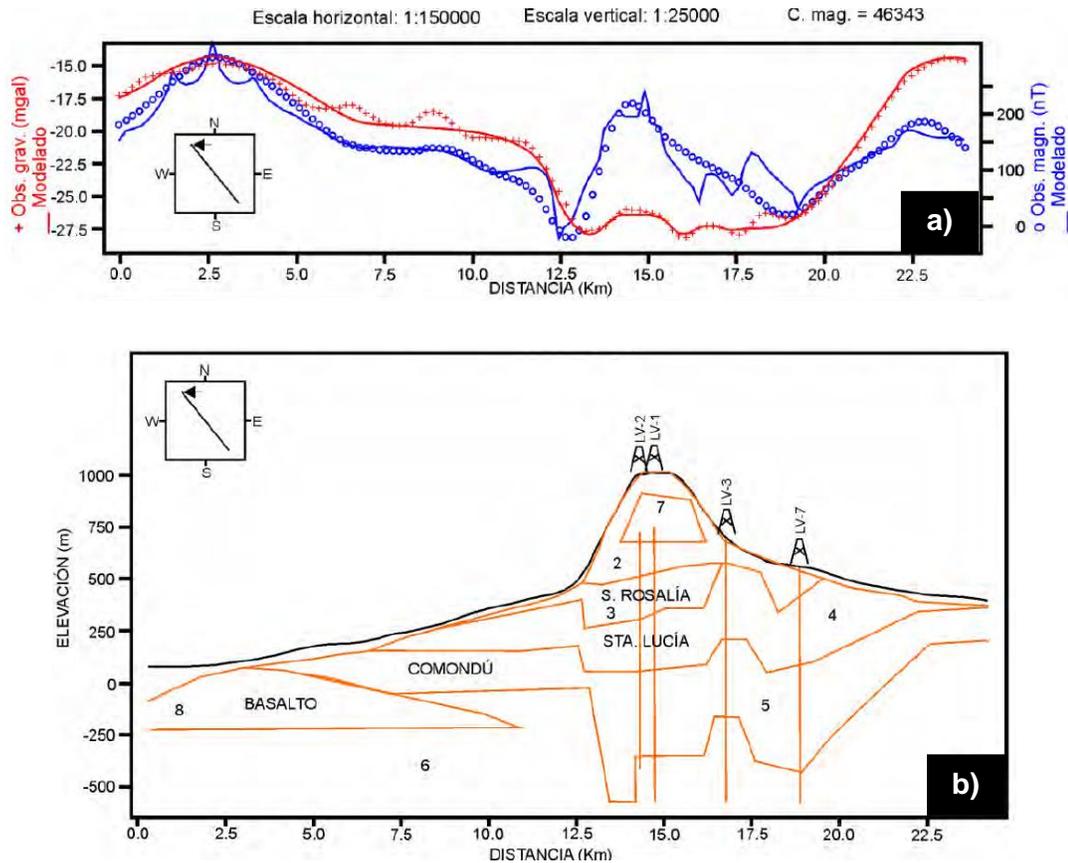


Figura 8. Modelo conceptual del CVLTV. Propuesto por López et al. (1993).

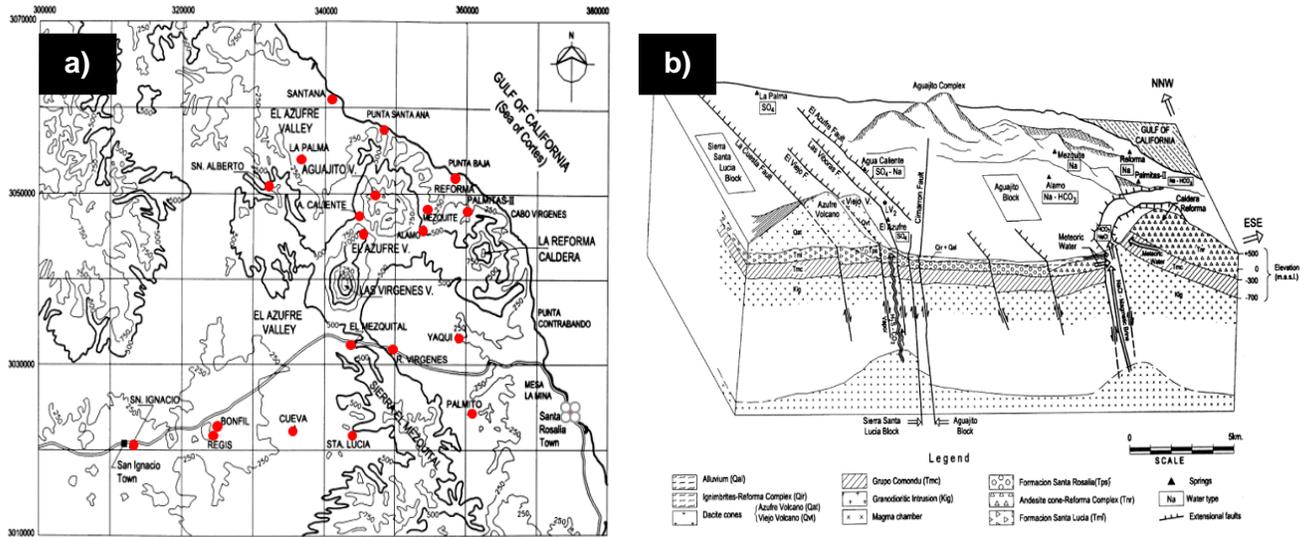
García-Estrada y González-López (1998) plantearon un modelo bidimensional del CGLTV, a partir de estudios de magnetometría, gravimetría y termometría. En los modelos se resalta que los altos y bajos

magnéticos están relacionados con horts y rifts (Figura 9.a) y las anomalías gravimétricas se relacionan con intrusiones, fallas, flujos geotérmicos y derrames sepultados (Figura 9.b).



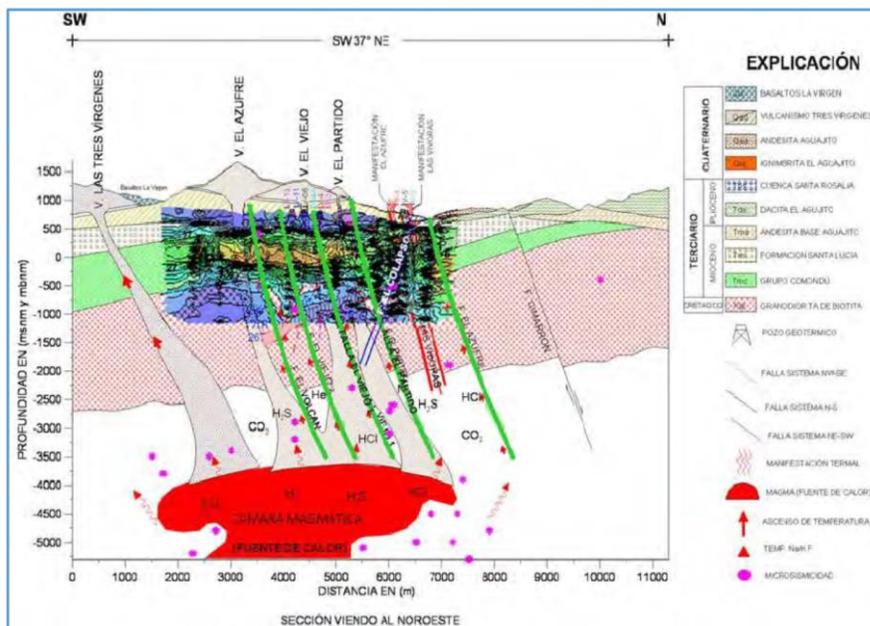
**Figura 9. (a)** La línea y círculos de color rojo representa los datos gravimétricos, la línea y círculos de color azul representan los datos de magnetometría. **(b)** Modelo bidimensional planeado de la estratigrafía del campo Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por García-Estrada y González-López (1998).

Portugal et al. (2000) realizaron estudios geológicos, geoquímicos, hidrogeoquímicos e isotópicos en los principales manantiales, pozos domésticos y geotérmicos, a partir de los cuales concluyeron que el reservorio geotérmico de Las Tres Vírgenes representa un sistema hidrodinámicamente estancado, que se recargó en el Holoceno o el Pleistoceno mediante agua fósil y meteórica y que a pesar de la cercanía al Golfo de California y al Océano Pacífico, no se evidencia una intrusión de agua de mar en el reservorio geotérmico. El flujo subterráneo lo relacionaron con la abundancia de fallas extensionales locales, de tendencia NW-SE, que generan una permeabilidad secundaria. Además, los autores proponen un modelo hidrogeológico del CVLTV (Figura 10).



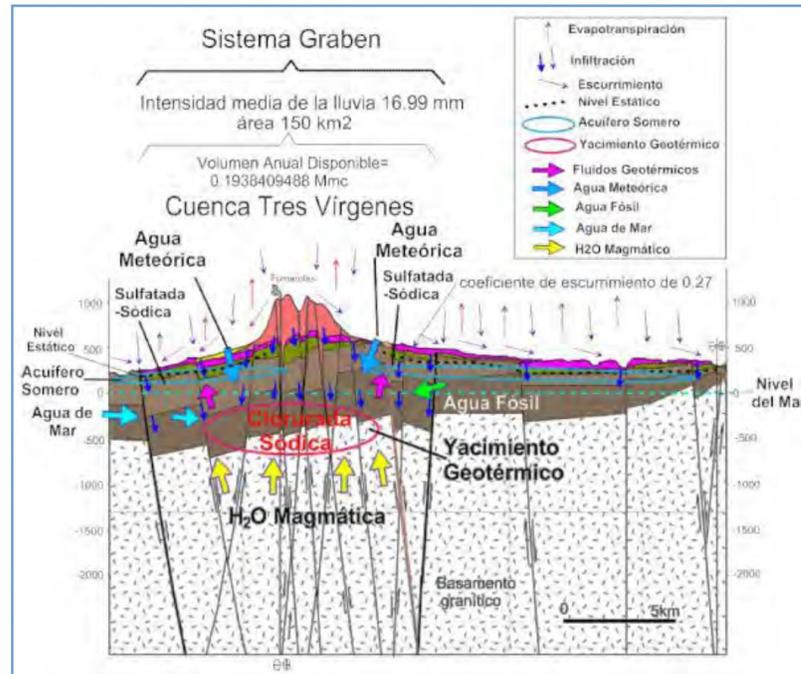
**Figura 10. a)** Modelo hidrogeológico del CVLTV. **b)** Mapa del CVLTV y las principales manifestaciones termales (puntos de color rojo). Propuesto por Portugal et al. (2000).

Gómez et al. (2010) realizaron el análisis de 230 sondeos transitorios electromagnéticos, registrados en los años 1999, 2008, 2009 y la recopilación de la información geológica, geofísica para realizar un modelo conceptual del CVLTV (Figura 11), sin embargo, no logran dar detalles acerca de las dimensiones y profundidad de la cámara magmática con exactitud.



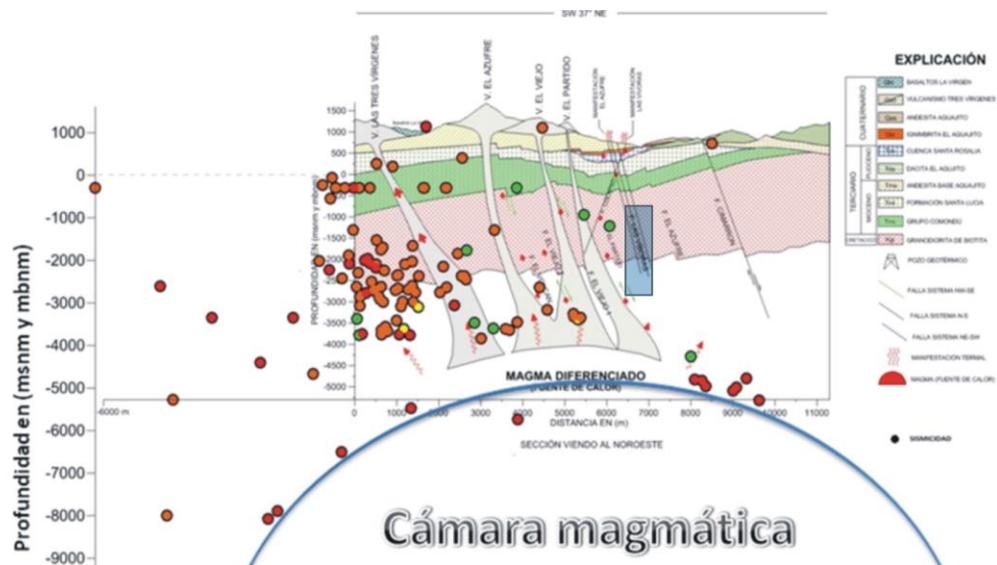
**Figura 11.** Modelo geológico del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por Gómez et al. (2010).

Benton et al. (2011) mediante estudios geohidrológicos y complementando los modelos propuestos anteriormente, sugieren un modelo del CGLTV (Figura 12) en el que se muestra la presencia de acuíferos someros semiconfinados separados de la fuente termal por capas sello volcánicas y suponen un acuífero salino, probablemente formado por la infiltración de agua de mar a través de las fallas (Antayhua-Vera, 2017).



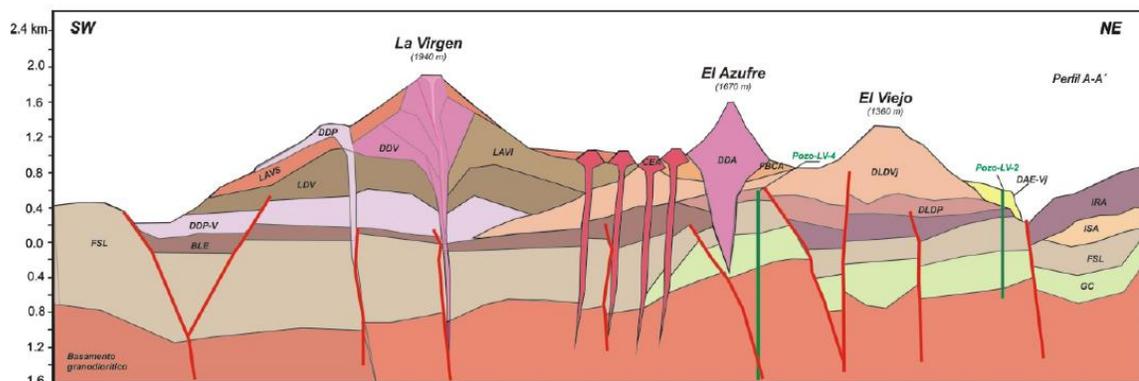
**Figura 12.** Modelo hidrogeológico del campo geotérmico Las Tres Vírgenes. Propuesto por Benton et al. (2011).

Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013) actualizaron el modelo conceptual propuesto por Gómez et al. (2010), usando el análisis de monitoreo de la actividad microsísmica pasiva en Tres Vírgenes, con el propósito de identificar zonas permeables en el subsuelo asociadas a fallas geológicas; en su trabajo infirieron una brecha sísmica a 5.5 km de forma redonda, que parece ser la cima de un lacolito asociado a la cámara magmática del CGLTV que tendría aproximadamente 13 km de longitud (Figura 13).



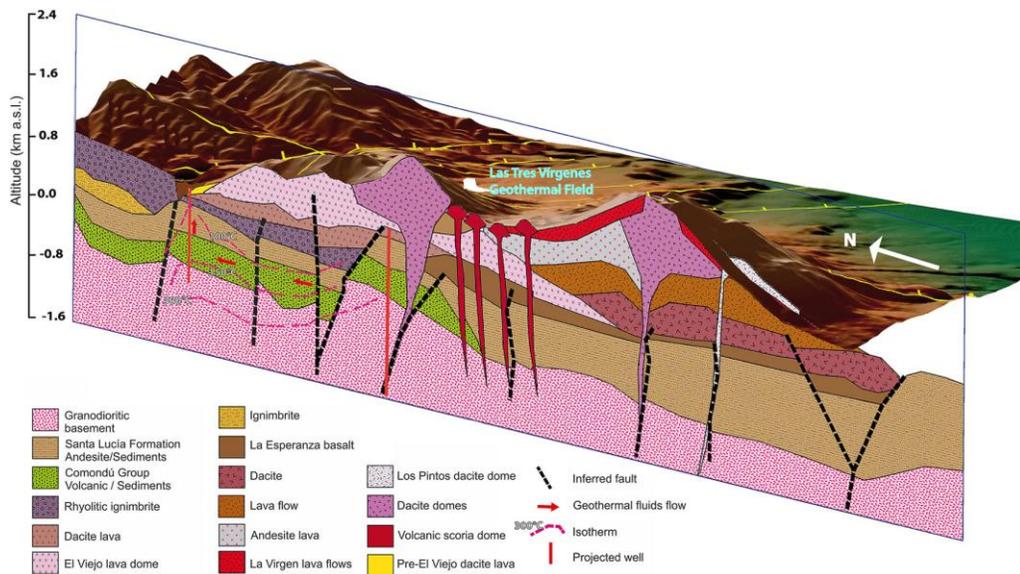
**Figura 13.** Actualización del modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013).

Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2012, 2013) realizaron una actualización de la información geológica, estratigráfica y estructural del CVLTV, mediante el mapeo en campo y las dataciones de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de roca, con lo que definieron 29 unidades geológicas (Figura 3) y crearon un modelo conceptual geológico y estratigráfico del CGLTV (Figura 14), plantean que las estructuras volcánicas de Las Tres Vírgenes se formaron en los últimos 200,000 años a lo largo de una fisura eruptiva (sistema de fallas Cimarrón).



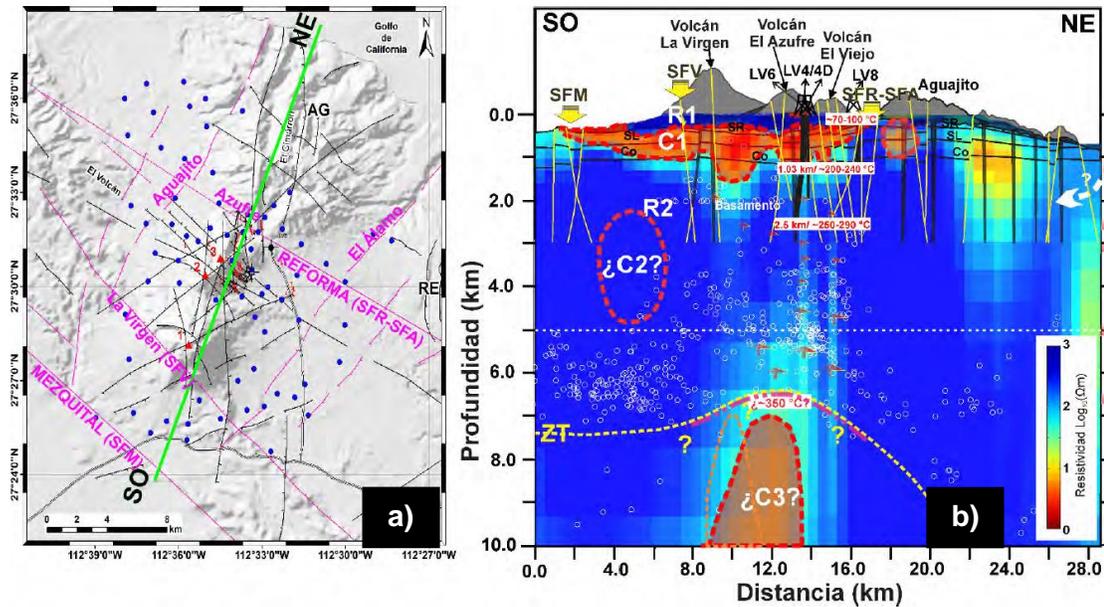
**Figura 14.** Modelo estratigráfico del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).

Prol-Ledesma et al. (2016) realizaron una recopilación de trabajos geofísicos realizados en el CVLTV. A partir de datos gravimétricos determinaron la dirección NE-SW del volcán El Azufre, el volcán Partido y de la sierra El Aguajito y la dirección NW-SE del cañón El Azufre, los mínimos magnéticos fueron asociados con la alteración hidrotermal en el área de El Azufre, La Biznaga y Las Víboras. Posteriormente, construyeron un modelo conceptual del CGLTV (Figura 15) basándose también en los trabajos realizados por López-Hernández et al. (1995) y Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013), en el que se observa a grandes rasgos las estructuras principales del CGLTV, las fallas y dieciséis capas estratigráficas inferidas.



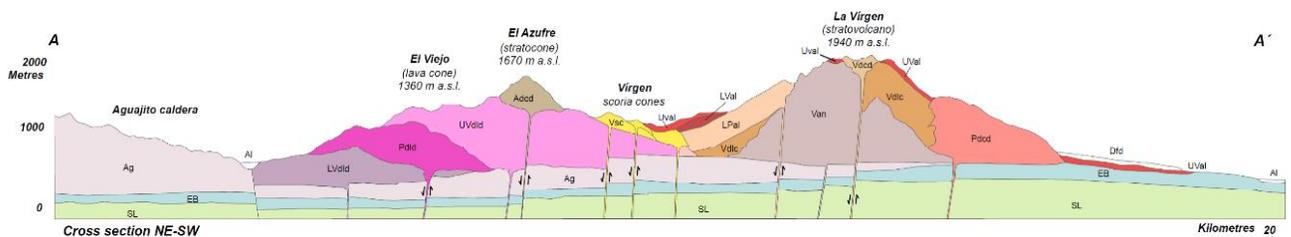
**Figura 15.** Modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Propuesto por Prol-Ledesma et al. (2016), modificado de Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). {Formatting Citation}

Antayhua-Vera (2017) mediante la integración de datos sísmicos, aeromagnéticos y magnetométricos, construyó un modelo conceptual del CVLTV (Figura 16). A profundidades menores a 100 m encontró una secuencia de rocas volcánicas R1, determinada por resistividades que variaban entre los 30-80  $\Omega$ m, entre los 0.5-1.5 km encontró una anomalía conductiva C1, a una profundidad entre 1.1 y 6.5 km se encuentra R2, relacionada con el basamento granodiorítico de temperaturas entre 250°C y 320°C, posteriormente se encuentra la secuencia conductora ¿C3? asociada a la intrusión de un cuerpo caliente o de la cámara magmática. Los eventos sísmicos se concentran a profundidades entre 0.2 y 7.4 km m.b.n.m. y se estima que la zona de transición frágil-dúctil se encuentra a una profundidad de ~7.4 km.



**Figura 16.** Modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Virgenes (CGLTV). **(a)** Modelo tectónico y representación de la sección SO-NE, **(b)** Modelo conceptual de la sección SO-NE, R1 y R2 son zonas resistivas; C1, ¿C2? y ¿C3? zonas conductivas; los círculos blancos son los hipocentros (2003-2013); la línea amarilla representa la transición frágil-dúctil; La flecha blanca representa el ingreso de agua de mar (Cuenca de Guaymas); las flechas en color rojo indica el ascenso del flujo de calor. Propuesto por Antayhua-Vera (2017).

Avellán et al. (2018, 2019) realizaron la reconstrucción geológica de la evolución del CVLTV, definida en cuatro épocas eruptivas durante el Pleistoceno Tardío con al menos dieciséis unidades de lava y cúpulas de composiciones andesíticas a dacíticas (Figura 17). Adicionalmente, realizaron estudios sobre la distribución de los enjambres sísmicos y la interpretación de datos aeromagnéticos, a partir de los cuales revelaron la posible presencia de grupos de diques relacionados con fuentes magmáticas poco profundas que pueden estar alimentando el CGLTV. La cinemática de fallas indica que los respiraderos volcánicos migraron progresivamente desde el volcán El Viejo al volcán La Virgen.



**Figura 17.** Perfil geológico del CVLTV. Propuesto por Avellán et al. (2019) y modificado de Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).

## 1.4. Justificación

La energía geotérmica se ha convertido en una de las fuentes generadoras de energía eléctrica más importantes a nivel mundial, debido al bajo impacto producido al medio ambiente, por ser altamente eficiente y económicamente rentable. Asimismo, puede ser ampliamente utilizada en una serie de procesos domésticos, entre ellos: bombas de calor, calefacción, invernaderos, desalinizadoras, entre otras, que requieren de calor, a éstos se les conoce como los usos directos de la geotermia, que son posibles gracias al amplio rango de temperatura que maneja dicho tipo de energía. Por estas razones cada vez son más los países que ingresan en este sector energético y que buscan desarrollar nuevos proyectos geotérmicos, motivados por reducir la contaminación del planeta y por dejar a un lado la alta dependencia de los combustibles fósiles.

Actualmente, Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía, Nueva Zelanda y México, tienen la más alta capacidad geotermoeléctrica instalada a nivel mundial (Ritchter, 2019). México, a pesar de ocupar la sexta posición, se ha visto en la tarea de impulsar nuevos proyectos de exploración en las zonas aledañas de los campos geotérmicos que opera (Cerro Prieto, Los Azufres, Los Hornos, Las Tres Vírgenes y Domo San Pedro) con el fin de identificar y aprovechar nuevas zonas con potencial geotérmico y aumentar la capacidad instalada del país. En este sentido, el CGLTV, a pesar de ser un campo en explotación, todavía tiene zonas y estructuras que no han sido estudiadas, por lo que realizar estudios de exploración geofísica permite aportar información de la localización de nuevas zonas de oportunidad con posible potencial geotérmico dentro del CVLTV.

Esta tesis propone realizar la adquisición, procesamiento, interpretación e integración de datos sísmicos de fuente controlada (reflexión y MASW) y gravimétricos en un sector del CVLTV, además, de la construcción de perfiles correlacionados con columnas litológicas de los pozos perforados en el campo y la geología superficial, con el objetivo de determinar las principales características estructurales del subsuelo y entender el comportamiento del complejo volcánico. Finalmente, con la integración de los resultados se estima definir nuevas áreas de oportunidad, para aprovechar en gran medida el recurso geotérmico, no solo para producir energía eléctrica, sino también, para la implementación de los usos directos que beneficien directamente a la población.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

Determinar el comportamiento geológico-estructural en sectores dentro y fuera del campo geotérmico Las Tres Vírgenes a partir de la interpretación e integración de los métodos de sismica de reflexión, MASW y gravimetría, para identificar una probable zona de oportunidad y de extensión del potencial geotérmico.

### **1.5.2. Objetivos Particulares**

1. Definir las posibles zonas que permiten el ascenso del fluido geotérmico, mediante la identificación de las principales fallas que afectan el sistema estructural tanto en superficie como en profundidad.
2. Evaluar el aporte del método de sismica de reflexión en el estudio geológico-estructural aplicado en ambientes geotérmicos netamente volcánicos, como es el caso del campo geotérmico Las Tres Vírgenes y el CVLTV.
3. Definir la distribución de las capas someras dentro del campo geotérmico Las Tres Vírgenes, a partir del análisis de velocidad de las ondas superficiales y correlacionar los resultados con la información de la columna litológica del pozo somero El Azufre.
4. Correlacionar los modelos obtenidos del CVLTV construidos a partir de los datos gravimétrico y la información de las columnas litológicas de los pozos geotérmicos con los modelos propuestos en la literatura.
5. Establecer la relación estructural en la zona de transición entre el campo geotérmico Las Tres Vírgenes y la caldera El Aguajito, para determinar si existe una relación entre estas estructuras volcánicas.
6. Identificar una probable zona de oportunidad y de extensión del potencial geotérmico actual del campo Las Tres Vírgenes, mediante la integración de la información sísmica y gravimétrica para aumentar la productividad del campo.

## Capítulo 2. Metodología

---

Los métodos geofísicos permiten identificar de manera indirecta los rasgos geológicos del subsuelo, por medio del estudio de la distribución de las propiedades físicas en el subsuelo (p. ej. densidad, resistividad eléctrica, velocidad de propagación, susceptibilidad magnética, entre otras). Una vez que se determina el propósito de la exploración y la propiedad física a explorar, se aplica el método geofísico adecuado: eléctrico, sísmico, gravimétrico, magnetotelúrico, entre otros, con el fin de caracterizar el subsuelo (Kearey et al., 2013).

### 2.1. Método Sísmico

El método sísmico analiza la propagación de las ondas a través del subsuelo; éstas viajan a diferentes velocidades determinadas por la impedancia acústica y las propiedades elásticas del medio a través del cual se están desplazando. La impedancia acústica ( $Z$ ) está definida por la siguiente ecuación:

$$Z = V\rho \quad (1)$$

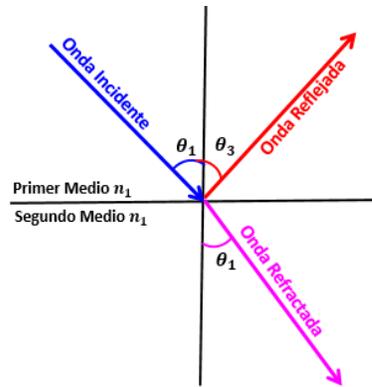
donde  $V$  es la velocidad de la onda sísmica en m/s y  $\rho$  es la densidad de la roca en g/cm<sup>3</sup>.

Cuando una onda sísmica se transmite en un medio que tiene diferentes impedancias acústicas, una porción de la energía de la onda incidente o transmitida se refleja (ondas reflejadas) y la otra porción se refracta (ondas refractadas) y se generan cambios en la dirección y velocidad de la propagación de la onda (Figura 18). La Ley de Snell permite calcular el ángulo de refracción de la onda incidente al atravesar la separación entre dos medios de propagación con índice de refracción distinto, está definida como:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los materiales,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  representan el ángulo de incidencia.

Las ondas reflejadas se rigen por las leyes de reflexión, la primera ley establece que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal se encuentran en un mismo plano y la segunda ley, que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión  $\theta_1 = \theta_3$ .



**Figura 18.** Propagación de la onda incidente, reflejada y refractada, en medios con propiedades físicas diferentes.

Las ondas sísmicas se clasifican en ondas de cuerpo y ondas superficiales. **Las ondas de cuerpo**, viajan a través del interior de la Tierra, siguiendo caminos que se generan debido a la variabilidad de la densidad y a la composición del subsuelo, este tipo de ondas se divide en dos grupos: Las ondas primarias y secundarias (Wiederhold, 1991) (Figura 19).

- **Las ondas primarias (P), compresionales o longitudinales:** Producen compresiones y dilataciones en el medio; se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de la propagación de la onda. Las ondas primarias, pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. En un medio isótropo y homogéneo la velocidad de propagación de la ondas P se define con la siguiente ecuación:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (3)$$

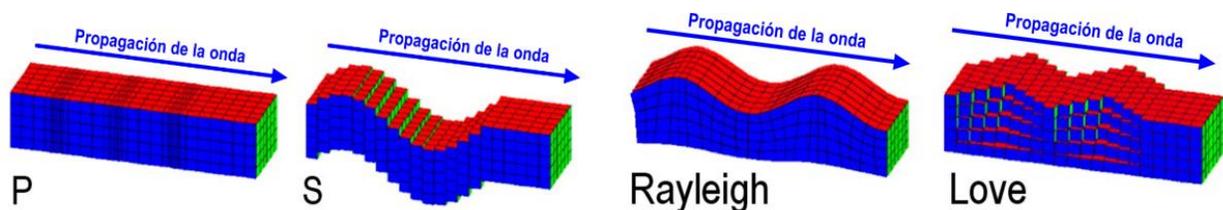
donde K es el módulo de compresibilidad que indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen,  $\mu$  es el módulo de corte o rigidez, con el cual se determina el comportamiento elástico de un material y  $\rho$  es la densidad del material a través del cual se propaga la onda mecánica.

- **Ondas secundarias (S), de corte o de cizalla:** Son aquéllas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación. La velocidad de propagación de las ondas S en medios isótropos y homogéneos depende del módulo de corte y de la densidad del material (Ecuación 4), por lo tanto, este tipo de ondas solo se desplaza en medios sólidos.

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4)$$

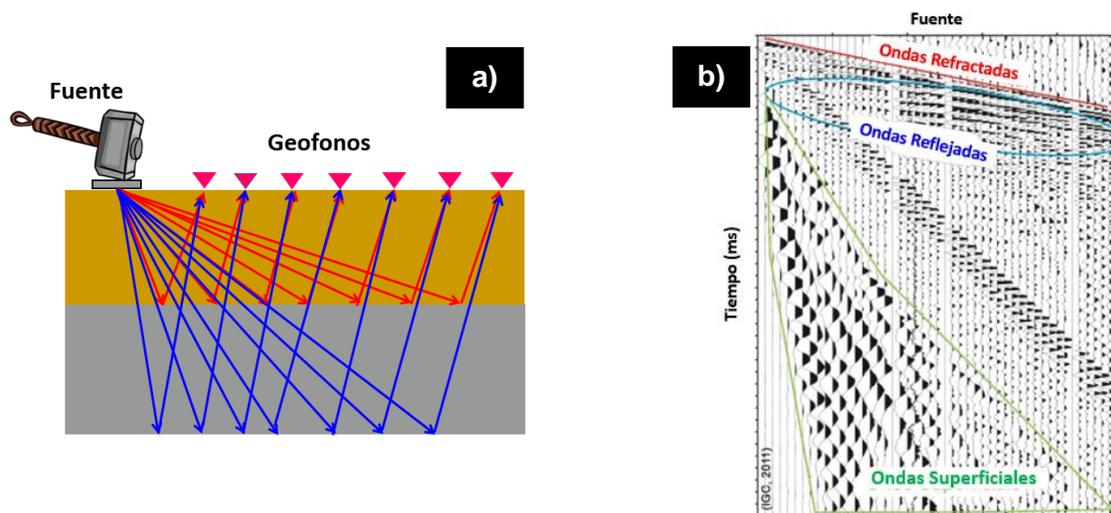
Las **ondas superficiales**, se propagan de forma paralela a la superficie de la Tierra, son de carácter dispersivo, esto significa que las ondas de diferentes frecuencias viajan con diferentes velocidades, esta propiedad es usada para determinar las propiedades elásticas de los cuerpos superficiales en el subsuelo. Las ondas superficiales se dividen en: Las ondas Rayleigh y las ondas Love (Figura 19).

- **Ondas de Rayleigh (R):** Es una combinación de la componente vertical de la onda S y la onda P que se da en el plano vertical de propagación. El movimiento de las ondas Rayleigh es elíptico retrógrado en un plano vertical con respecto a la superficie de la Tierra y las amplitudes del modo fundamental de propagación decrecen con la profundidad (Cruz Hernández, 2012; Batista-Cruz et al., 2019). La velocidad de propagación de las ondas Rayleigh, es ligeramente menor que la velocidad de la onda S,  $V_R \approx 0.92V_s$ , por lo que para efectos prácticos del método MASW se tratan como la misma (Wiederhold, 1991).
- **Ondas Love (L):** Se producen por la interferencia de numerosas ondas secundarias que son propagadas por una capa elástica superficial, situada por encima de otro medio elástico. El movimiento de la partícula de la onda de Love es paralelo a la superficie, pero perpendicular a la dirección de propagación.



**Figura 19.** Propagación de las ondas de cuerpo (P y S) y de las ondas superficiales (Rayleigh y Love). Modificado de Linares (2005).

La aplicación del método sísmico consiste en generar ondas sísmicas a partir de una fuente controlada (explosivos, martillo, caída de pesos, vibradores, pistolas de aire, entre otros), para medir el tiempo que tarda en viajar una onda acústica desde dicha fuente, atravesar las capas del subsuelo y finalmente ser registrada por una serie de geófonos o receptores dispuestos en la superficie; estos receptores a su vez transforman la onda acústica de llegada, en una señal eléctrica, la cual pasa a ser registrada en un sismograma, donde la señal de cada geófono queda representada como una traza, posteriormente esta información sísmica es procesada e interpretada, para obtener una imagen sísmica de calidad que permitan caracterizar el subsuelo (Figura 20. a). En un sismograma se registran todos los tipos de onda: directa, refractada, reflejada, superficiales, entre otras, (Figura 20. b) y para analizar el comportamiento de cada una de ellas en el subsuelo, los métodos sísmicos se dividen: sísmica de refracción, sísmica pasiva REMI, sísmica de reflexión, el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, por sus siglas en inglés), ente otros.



**Figura 20. a)** Modelo de adquisición de datos sísmicos terrestres. **b)** Registro de ondas sísmicas en el que se registraron tres tipos de ondas (reflejadas, refractadas y superficiales).

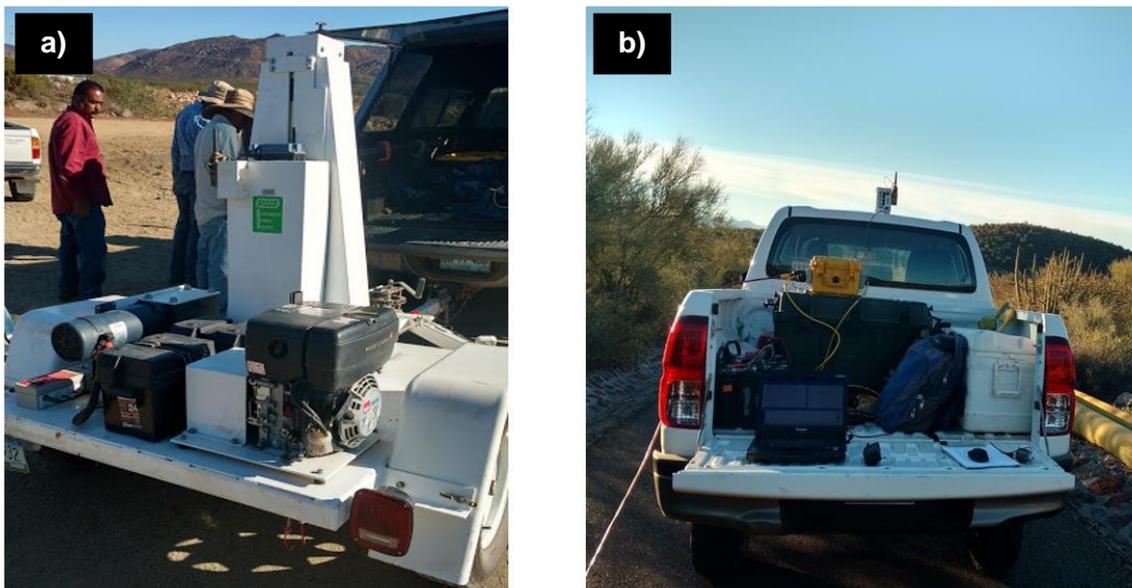
### 2.1.1. Sísmica de reflexión

La sísmica de reflexión es una de las técnicas de exploración geofísica más utilizadas en la industria desde el año 1927, debido a la profundidad y detalle que puede alcanzar, este método se basa en el análisis de las ondas sísmicas reflejadas y el objetivo principal es obtener una imagen sísmica de *offset* (distancia fuente-receptor) cero, en donde los reflectores representan los cambios de impedancia acústica en el subsuelo (Yilmaz, 1987).

La interpretación de los datos de sismica de reflexión, ha sido ampliamente utilizada en la solución de problemas enfocados en la tectónica y estratigrafía de ambientes sedimentarios, sin embargo, no suele ser utilizada en el estudio de ambientes netamente volcánicos, debido a que los entornos volcánicos, generan difracciones y atenuación de las ondas sísmicas, lo que dificulta obtener una imagen sísmica de calidad. El desarrollo del método de sismica de reflexión consiste en tres etapas: Adquisición, Procesamiento e Interpretación de los datos.

### 2.1.1.1. Adquisición

Los datos de sismica de reflexión se adquirieron durante el desarrollo de la campaña de adquisición de datos geofísicos del proyecto número 2016-01-2188 del CONACYT, que se llevó a cabo en el mes de noviembre de 2018, dentro y fuera del CGLTV, Baja California Sur. Los datos recolectados fueron tomados usando la fuente impulsiva GISCO ESS500 propiedad del CICESE y un tendido lateral de 24 geófonos de 14 Hz de frecuencia natural, espaciados 10 m entre ellos y un *offset* inicial de 50 m (Figura 21). En la Tabla 1, se muestran los principales parámetros de adquisición.

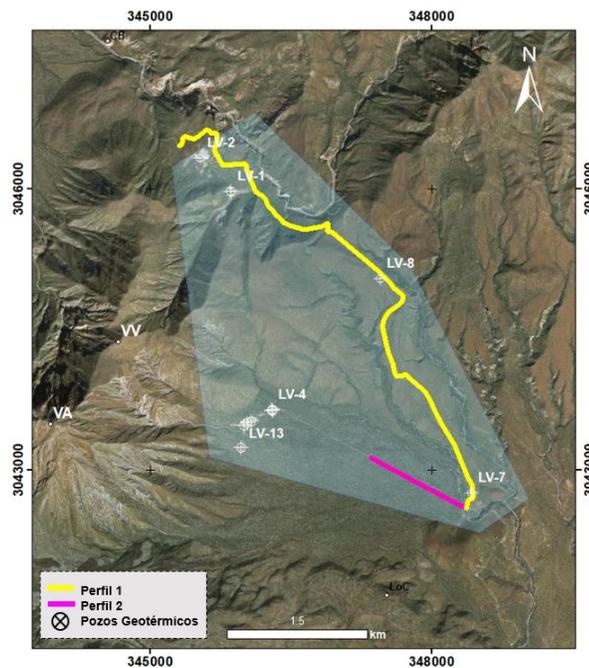


**Figura 21.** Equipo de adquisición de datos sísmicos terrestres. **a)** Fuente GISCO ESS500. **b)** Sismógrafo, radio, computadora de campo y baterías.

**Tabla 1.** Parámetros de adquisición de datos sísmicos durante la campaña de exploración geofísica en el CGLTV.

PARÁMETROS	VALORES
Fuente de energía	Fuente Impulsiva: GISCO ESS500
Longitud del Perfil 1	6400 m
Longitud del Perfil 2	1100 m
Distancia entre receptores	10 m
Offset	50 m
Número de canales o geófonos	24
Intervalo de muestreo	0.125 ms
Tiempo de grabación	2000 ms

Se adquirieron dos perfiles de datos sísmicos de reflexión (Figura 22). El perfil 1, que se trata de una línea quebrada de 6.4 km de extensión aproximadamente, tomada desde la parte norte fuera del CGLTV pasando cerca del pozo LV-2 y hasta la parte sur donde se ubica el pozo LV-7. El perfil 2 que tiene alrededor de 1.1 km de extensión y se realizó en dirección a los principales pozos productores del CGLTV, los dos perfiles se realizaron a un costado de la carretera dentro del campo geotérmico.

**Figura 22.** Perfiles de adquisición de datos de sísmica de reflexión dentro del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (polígono azul). Perfil 1 (línea quebrada amarilla) y Perfil 2 (línea fucsia). VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre.

### 2.1.1.2. Procesamiento

El objetivo del procesamiento de los datos de sismica de reflexión consiste en aislar las reflexiones de otros eventos sísmicos que se superponen a ellas, con el objetivo de mejorar la calidad de la imagen sísmica y obtener un modelo representativo del subsuelo y posteriormente poder realizar una adecuada interpretación geológica (Yilmaz, 1987). El procesamiento de los datos, se llevó a cabo usando el software especializado ProMAX de la plataforma Landmark™, en el laboratorio de procesamiento de datos sísmicos del CICESE, siguiendo la secuencia convencional de procesado sísmico propuesto por Yilmaz (2001), la cual se divide en tres etapas: Pre-Apilamiento, Apilamiento y Post-Apilamiento (Figura 23).



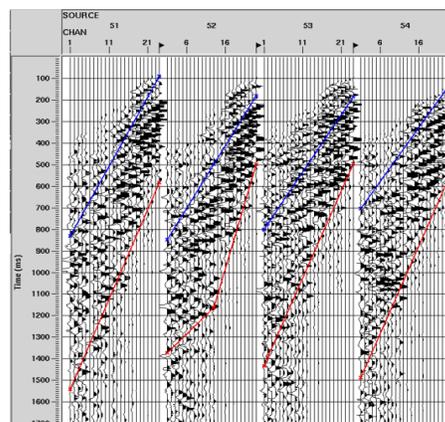
**Figura 23.** Secuencia del procesado de sismica de reflexión. Propuesto por Yilmaz (2001).

- **Etapas 1. Pre-Apilamiento**

Los datos sísmicos de campo se almacenan en formatos SEG-Y (formato universal de datos sísmicos establecido por la Sociedad de Geofísicos de Exploración) y posteriormente se cargan al software de procesamiento ProMAX.

- 1. Geometría:** Donde se definen las coordenadas (X, Y, Z) de cada una de las fuentes y receptores, así como el *offset* y el azimut, en algunos casos estos parámetros ya vienen incluidos en el formato SEG-Y, en otros, se agregan manualmente en el programa de procesamiento.

2. **Edición de trazas.** Se eliminan las trazas que generan ruido aleatorio en los registros sísmicos, ocasionados probablemente por problemas en la adquisición de los datos en campo.
3. **Corrección de estáticas:** Se usa la corrección de estáticas por elevación, para compensar los efectos de las variaciones de las elevaciones (generadas por el desgaste, meteorización o variación del espesor de la capa somera del suelo) a las cuales se encuentran las fuentes y los receptores. Con el fin de corregir este patrón, se determina el tiempo de arribo de las reflexiones, como si las fuentes y los receptores estuvieran ubicados en el mismo plano de referencia (*datum*), sin material de baja velocidad. En el caso de tener líneas quebradas no es recomendable aplicar otro tipo de corrección estática como por ejemplo por refracción, debido a que los cambios de las pendientes puede que no se deban a una refracción de una capa somera, sino al cambio en la dirección del tendido de geófonos.
4. **Atenuación del *ground roll*:** El *ground roll* es un tipo de ruido coherente que se genera en la adquisición de datos sísmicos terrestres, que se caracteriza por la baja velocidad, bajas frecuencias y altas amplitudes, está formado principalmente de ondas Rayleigh. La energía de la onda del *ground roll* viaja a lo largo o cerca de la superficie del suelo tendiendo a enmascarar las señales de reflexión, por lo que se realiza este paso para atenuar estas ondas superficiales de los datos sísmicos, usando el filtro FK (Figura 24) (Zhang et al., 2005).



**Figura 24.** Análisis del *ground roll*.

5. **Deconvolución:** El sismograma registrado en la superficie  $x(t)$  es el resultado de la convolución del impulso inicial de la fuente  $w(t)$  con la respuesta del impulso del subsuelo  $e(t)$  y la suma del ruido aleatorio  $n(t)$  (Ecuación 5).

La deconvolución permite recuperar la señal original del subsuelo, comprime la ondícula básica registrada en el sismograma, con el propósito de eliminar las reverberaciones producidas por la fuente y también los efectos de los múltiples (Yilmaz, 2001).

$$x(t) = w(t) * e(t) + n(t) \quad (5)$$

Se aplica la deconvolución de tipo predictiva, que se vale del autocorrelograma (diagramas de las ondículas en fase cero), para detectar las reverberaciones y múltiples en éste, se definen los parámetros de distancia predictiva y longitud del operador, minlag y maxlag, en este caso 10 ms y 50 ms, respectivamente. La deconvolución, por lo tanto, permite aumentar la resolución temporal de las reflexiones y la calidad de la imagen sísmica.

- 6. Filtro pasabandas:** Se aplica el filtro pasabandas para eliminar el ruido y resaltar los eventos de reflexión, de manera que deja pasar la concentración de la energía en una banda limitada de frecuencias. En este caso se aplica un filtro tipo trapezoidal de rangos: (3-15-55-60 Hz) en el que se aceptan las frecuencias que contienen energía de reflexión coherente de las estructuras del subsuelo, este filtro se construye con base en el análisis espectral de frecuencias y se eliminan las frecuencias asociadas al ruido sísmico. Las frecuencias en las que se realizan los estudios, están relacionadas con la frecuencia de Nyquist (Ecuación 6), donde  $\Delta_t$  es el intervalo de muestreo del registro sísmico.

$$f_N = \frac{1}{2\Delta_t} \quad (6)$$

De manera que, si una onda es muestreada como en el caso de nuestros datos sísmicos, con un intervalo de 2 milisegundos, la frecuencia más alta registrada sin que exista el *aliasing*, será de 250 Hz y la frecuencia más baja registrada es la permitida por los receptores.

- 7. Filtro FK:** Llamado también filtro de velocidades ya que representa los datos sísmicos de reflexión en el espacio de número de onda y frecuencia. El filtro FK es usado para eliminar el ruido coherente, que presenta una tendencia lineal, cuyas pendientes definen las distintas velocidades de los eventos sísmicos, como por ejemplo el *ground roll*, el *aliasing* espacial, las refracciones,

entre otros, de los eventos reflexivos que proporcionan la información del subsuelo. El cambio de dominio se logra mediante la aplicación de la transformada de Fourier, del dominio de amplitud-tiempo a amplitud-frecuencia y luego al espectro F-K (Figura 26).

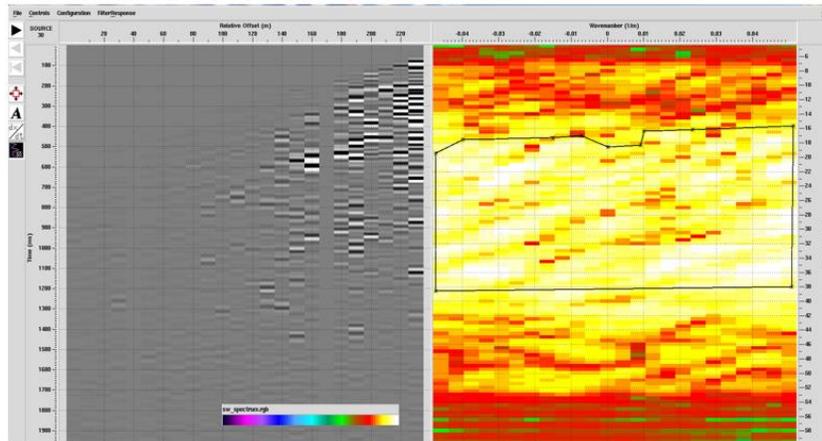


Figura 25. Filtro FK.

- **Etapa 2. Apilamiento**

La etapa de apilamiento consiste principalmente en el ordenamiento de las trazas por punto medio común (CMP), el análisis de velocidad, la corrección por NMO y el apilado.

1. **Ordenamiento de las trazas por CDP:** Se organizan las trazas sísmicas en conjuntos de puntos medios de reflejo común o CMP (Common Mid Point), se agrupan las trazas que tienen un mismo CMP entre una fuente y un receptor determinado, para mejorar la relación señal-ruido. Geométricamente el CMP es el punto en la superficie a medio camino entre la fuente y el receptor que es compartido por numerosos pares fuente-receptor (Figura 26).

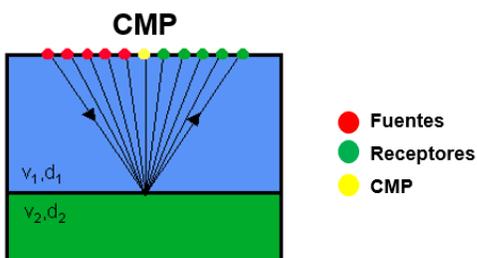


Figura 26. Representación del CMP, punto medio común.

El CMP se define como:

$$\Delta_{CMP} = \frac{\min(\Delta_g, \Delta_f)}{2} \quad (7)$$

donde  $\min(\Delta_g, \Delta_f)$  toma el valor del intervalo más pequeño de  $\Delta_g$  o  $\Delta_f$ , que se refieren a la distancia entre los geófonos y a la distancia entre las fuentes, respectivamente.

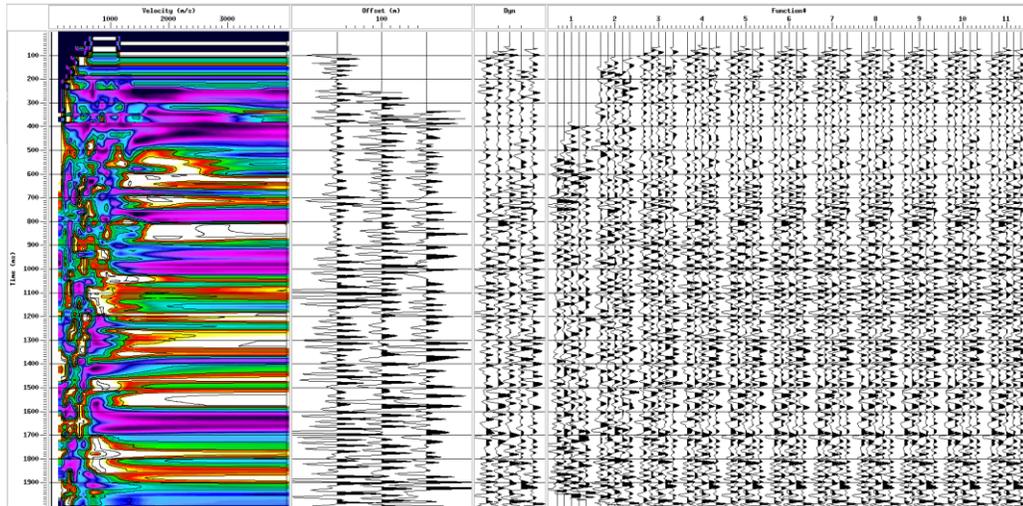
Al número de trazas que componen el CDP se le denomina *fold* (cobertura), que permite reducir el ruido incoherente, dado que cubre varias veces un mismo CDP que se encuentra en cierto intervalo, al mover y repetir distintas posiciones de las fuentes y del tendido, el *fold* está definido con la siguiente ecuación:

$$F = \frac{N_c \cdot \Delta_g}{2 \cdot \Delta_f} \quad (8)$$

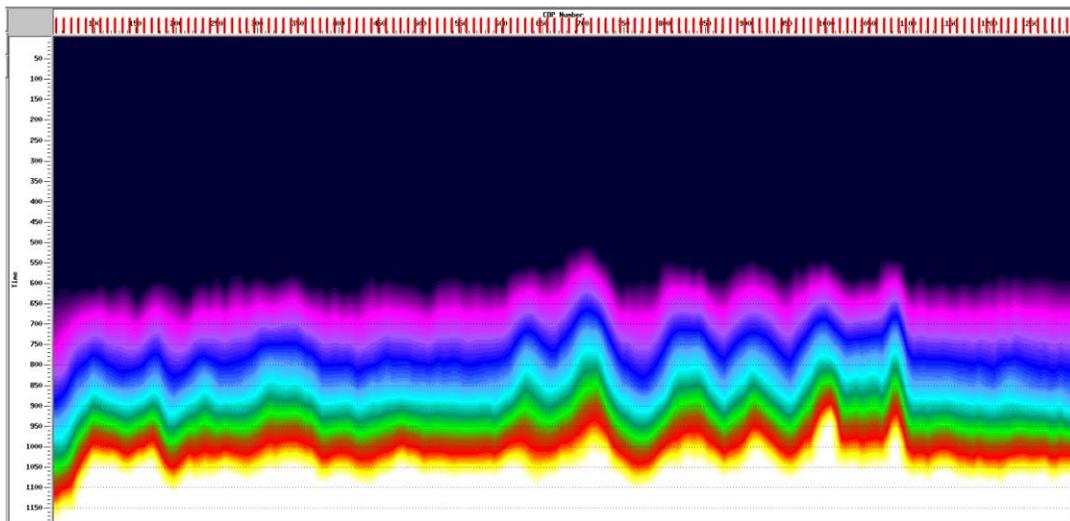
donde  $N_c$  representa el número de canales,  $\Delta_g$  es el intervalo de geófonos y  $\Delta_f$  es el intervalo entre las fuentes (Yilmaz, 1987).

- 2. Análisis de velocidad:** El objetivo del análisis de velocidades es determinar las velocidades del medio en el que se propagan las ondas sísmicas. Los tiempos de viaje en función del *offset* de un reflector con una velocidad constante tiene la forma de una hipérbola, así que el análisis está basado en la suposición de dichas hipérbolas de reflexión (Yilmaz, 1987).

El método usado para realizar el análisis de velocidades es el espectro de semblanza, en donde los valores de la energía resultante están representados como concentraciones de colores o semblanzas (Figura 27); la zona con la más alta concentración de colores está relacionada con las reflexiones en cada CDP y el mejor contraste de impedancia acústica. Generalmente la velocidad aumenta con la profundidad, a no ser que exista una capa de baja velocidad. Una vez que se ha realizado el análisis de velocidades se obtiene el modelo de velocidades de apilamiento del subsuelo (Figura 28).



**Figura 27.** Análisis de velocidad, técnica de espectro de semblanza, los tonos de color negro representan los valores de semblanza más altos y son los que corrigen el efecto de NMO.



**Figura 28.** Modelo de velocidades creado a partir del análisis de velocidades.

3. **Corrección por NMO (*Normal Moveout*):** La corrección por NMO pone de manera horizontal las hipérbolas de reflexión, busca que la fuente y el receptor sean posicionados a *offset* cero y que todas las trazas al estar en fase, puedan ser sumadas.
4. **Apilamiento:** El apilado consiste en sumar las trazas que pertenecen al mismo CMP, de esta manera el volumen de datos sísmicos es comprimido porque se genera una traza CDP final que tiene una mejor relación señal-ruido al amplificarse los eventos de reflexión.

- **Etapas 3: Post-Apilado**

Esta etapa final, consiste en aplicar algoritmos que permitan mejorar la resolución de la imagen sísmica y ubicar los reflectores en su posición original.

- 1. Divergencia esférica:** La fuerza de la onda (energía por unidad de área del frente de onda) disminuye con la profundidad, como resultado de la dispersión geométrica, por lo que la amplitud de la señal disminuye al alejarse de la fuente. La divergencia esférica consiste en reconstruir esas amplitudes del frente de onda que han ido decayendo con la distancia, es decir, que permite recuperar las amplitudes bajas de la sección sísmica.
- 2. Migración:** La migración permite corregir las difracciones, que se producen debido a cambios abruptos de los reflectores, colapsa las difracciones y reubica la energía de la onda a su verdadera posición. Se empleó el método de Kirchhoff para aplicar la migración, que se basa en la solución integral de la ecuación de onda, el método consiste en medir el tiempo que tarda el frente de onda en hacer la trayectoria emisor-reflector-receptor y posteriormente se calculan los posibles reflectores, los cuales geoméricamente guardan la forma de la mitad inferior de una elipse en el caso 2D. La información de una sola traza sísmica no permite definir cuál de todos los puntos infinitos es realmente la posición del receptor, pero con otra traza sísmica la migración permite calcular otros reflectores, el método Kirchhoff repite este procedimiento sobre todas las trazas y suma todas las contribuciones de las elipses, para finalmente generar una imagen del subsuelo, que tiene una mayor resolución espacial de los eventos reflectivos (Yilmaz, 2001).

### **2.1.2. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)**

El método MASW es una técnica de exploración sísmica introducida por primera vez en el ambiente geofísico por Park et al. (1999), la cual consiste en el estudio de la propagación de las ondas superficiales o las ondas de corte (ondas Rayleigh) a lo largo del subsuelo. Este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, los cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto de la fuente a los geófonos.

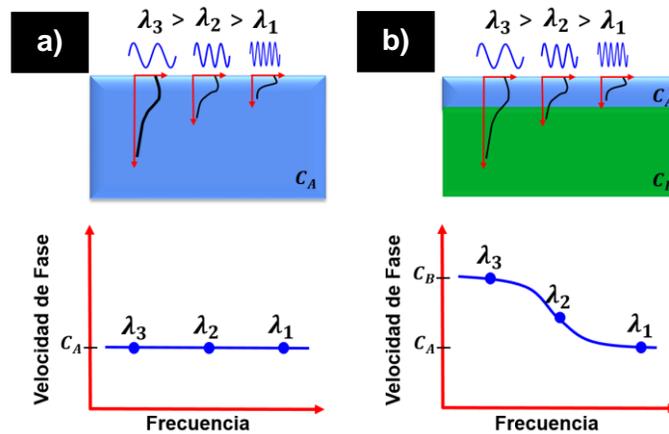
La velocidad de la onda de corte ( $V_s$ ) es una de las constantes elásticas que está estrechamente relacionada con el módulo de Young y el módulo de corte, por lo que,  $V_s$  es un indicador directo de la resistencia (rigidez) del terreno.

- **Carácter dispersivo de las ondas superficiales**

Un impacto en superficie genera ondas de corte y compresión, pero la energía se dispersa como ondas Rayleigh principalmente, en un porcentaje del 67%. A medida que las ondas superficiales se desplazan, las frecuencias individuales se van separando, lo que permite identificar las diferentes velocidades con las que se propagan dichas frecuencias (Serna Vásquez, 2015). En un semi-espacio homogéneo, la velocidad de propagación o velocidad de fase ( $c$ ) de las ondas Rayleigh será la misma siempre (Ecuación 9), en el caso de un medio heterogéneo, por ejemplo, un medio estratificado, la velocidad de fase depende de la frecuencia ( $f$ ) o de la longitud de onda ( $\lambda$ ), esta propiedad se conoce como dispersión (Humire Guarachi et al., 2015) (Figura 29). Las curvas de dispersión se representan en diagramas de velocidad de fase en función de la frecuencia.

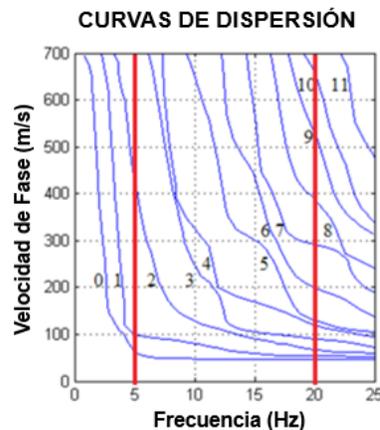
$$c = \lambda f \quad (9)$$

La dispersión de las ondas superficiales depende de la estratigrafía del sitio y en particular del perfil de velocidades de las ondas de corte (Figura 29). Las ondas Rayleigh se transmiten a cierta profundidad en el subsuelo dependiendo de la longitud de onda, cuando la longitud de onda es pequeña, la velocidad de fase dependerá de las capas someras, es decir, dará detalle de la estructura somera, mientras que, si la longitud de onda es mayor, se asocian a la estructura más profunda (Cruz Hernández, 2012).



**Figura 29.** Velocidad de fase ( $V$ ) para distintas longitudes de ondas ( $\lambda$ ) en un semiespacio homogéneo (a) y en un medio estratificado (b). Modificado de Humire Guarachi et al. (2015).

Los modos superiores de las curvas de dispersión están asociadas a los diferentes modos de vibración de la onda Rayleigh en el subsuelo. En la Figura 30, se muestran dos ejemplos de identificación de los modos en las curvas de dispersión: en el primer caso para una frecuencia de 5 Hz, se identifican tres modos (o velocidades de fase), para el segundo caso de 20 Hz se observan hasta 11 modos. Durante el procesamiento de los datos de MASW, lo que interesa es identificar la velocidad de fase más baja, es decir, el modo fundamental de la curva de dispersión (modo 0) y se desprecian los modos superiores.



**Figura 30.** Curvas de dispersión en las que se identifican los modos fundamentales y superiores para una frecuencia de 5 Hz y 20 Hz. Modificado de Humire Guarachi et al. (2015).

- **Curvas de dispersión**

Las imágenes de curvas de dispersión se generan a partir de un método de transformación de onda, estas curvas de dispersión están definidas en términos de velocidad de fase de la onda Rayleigh en función de la frecuencia y se obtienen directamente de los campos de onda registrados de un solo disparo (Park et al., 1998; Sena Lozoya, 2019); el método permite separar fácilmente los modos fundamentales, los cuales componente en gran medida los sismogramas, de los modos superiores y consiste en la aplicación de los siguiente pasos (Park et al., 1998):

Considerando que los sismogramas están definidos en términos de *offset* tiempo, ( $x-t$ ), donde  $x$  es desplazamiento de los receptores en metros, se pueden representar en el dominio  $u(x,t)$  de un registro, disparo o *shot-gather*, se aplica una transformada de Fourier y se obtiene  $U(x,\omega)$ :

$$U(x, \omega) = \int u(x, t) e^{i\omega t} dt \quad (10)$$

$U(x,\omega)$  puede ser expresado como la multiplicación de dos términos separados:

$$U(x, \omega) = P(x, \omega) A(x, \omega) \quad (11)$$

donde  $P(x,\omega)$  y  $A(x,\omega)$  son el espectro de fase y de amplitud, respectivamente. En  $U(x, \omega)$ , cada componente de frecuencia está separado de otras frecuencias y la información del tiempo de arribo se conserva en el espectro de fase, por lo que  $P(x,\omega)$  contiene la información de las propiedades de dispersivas y  $A(x,\omega)$  contiene la información de la atenuación y divergencia esférica. Por lo tanto  $U(x,\omega)$ , se puede expresar como:

$$U(x, \omega) = e^{i\Phi x} A(x, \omega) \quad (12)$$

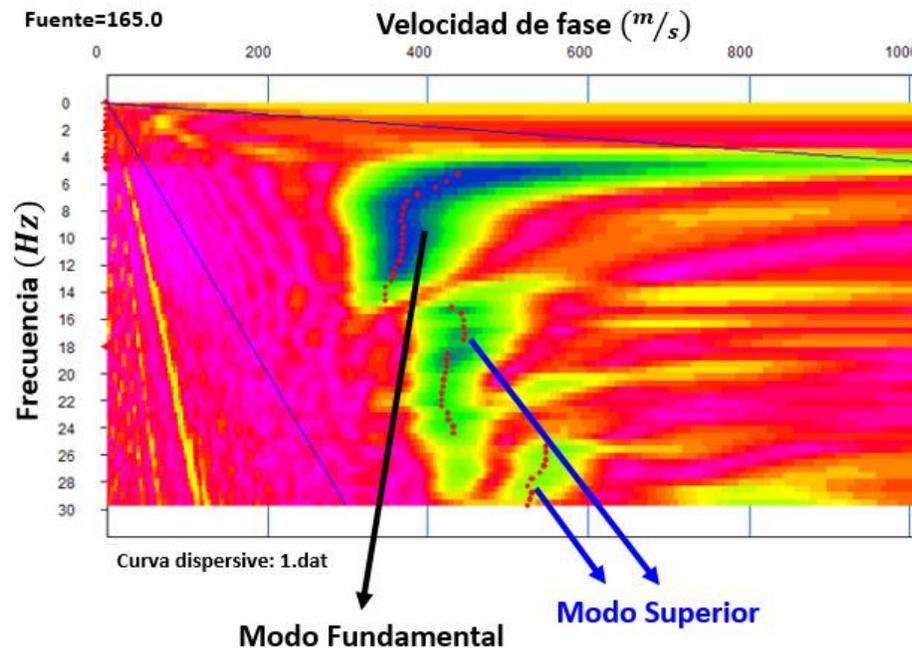
donde  $\Phi = \omega/C_{\omega}$ ,  $\omega$  es la frecuencia angular en radianes y  $C_{\omega}$  es la velocidad de fase para cada frecuencia  $\omega$ . Luego se aplica una transformación integral a  $U(x,\omega)$  a la ecuación 12 y se obtiene:

$$V(\omega, \phi) = \int e^{-i(\Phi-\phi)x} [A(x, \omega)/|A(x, \omega)|] dx \quad (13)$$

$U(x, \omega)$  se normaliza con respecto a los efectos de la atenuación y la divergencia esférica. Para un valor dado de  $\omega$ ,  $V(\omega, \Phi)$ , tendrá un valor máximo si:

$$\phi = \Phi = \omega / C_\omega \quad (14)$$

porque  $A(x, \omega)$  es real y positivo. Para un valor de  $\Phi$  donde se produce un pico de  $V(\omega, \Phi)$ , se puede determinar la velocidad de fase  $C_\omega$ . Las curvas de dispersión resultan de la transformación de  $V(\omega, \Phi)$  para obtener  $I(\omega, C_\omega)$  a través del cambio de variables  $C_\omega = \omega / \Phi$ . En  $I(\omega, C_\omega)$  habrá picos en el eje  $C_\omega$  que satisfacen la ecuación 14. Los picos que se forman alrededor de los valores de  $C_\omega$  construyen las imágenes de las curvas de dispersión en las que se puede observar la distribución de la velocidad de fase en función de la frecuencia (Figura 31).



**Figura 31.** Curva de dispersión, en la que se puede observar la separación del modo fundamental y los modos superiores de la onda Raleigh.

- **Inversión de los datos**

Los perfiles  $V_s$  se calculan a partir de un proceso de inversión iterativo que usa los datos de dispersión y las estimaciones de la relación y densidad de Poisson, mediante el método de mínimos cuadrados se realiza el proceso, el cual está definido como (Park et al., 1999):

$$AX = Y \quad (15)$$

donde la A, representa una matriz de orden MxN, con elementos dispuestos en M filas y N columnas, la cual incluye información de la trayectoria de los rayos, X corresponde al modelo de velocidades de onda S, la variable Y guarda la información de los tiempos de arribo de las ondas. Se debe establecer un modelo inicial del subsuelo, como punto de partida para el proceso de inversión iterativa y el método de inversión garantiza que el proceso del proceso converja en un resultado confiable para una amplia gama de modelos iniciales. El desarrollo del método MASW consiste en tres etapas: Adquisición, Procesamiento e Interpretación de datos sísmicos.

#### **2.1.2.1 Adquisición**

El método MASW puede ser de tipo activo cuando las ondas superficiales se generan por una fuente artificial o de tipo pasivo, cuando se generan por una fuente natural (Park et al., 2007). En este trabajo se aplicó el método de MASW activo. Los datos de MASW se adquirieron junto con los datos de sísmica de reflexión del perfil 1 (Figura 22), usando la misma configuración y espaciamiento de los instrumentos (Tabla 1), adicionalmente en el primero y ultimo tendido, se aplicó la configuración de fuente móvil, en el que la fuente realizaba disparos a 50, 25 y 5 m de distancia del primer y del último geófono y además entre cada par de geófonos, para tener una mayor redundancia de las velocidades de fase. Los datos multicanal permiten la identificación y rechazo de los modos no fundamentales de ondas Rayleigh, reducir el ruido presente en la señal y un proceso de recolección de datos más rápido (Louie, 2001).

La fuente sísmica impulsiva GISCO ESS500 es capaz de generar un alto nivel de energía de impacto al suelo, lo que genera ondas superficiales de frecuencias más bajas (longitudes de onda más largas), que penetren más profundo en el subsuelo y por lo tanto permite aumentar la profundidad de investigación del método sísmico.

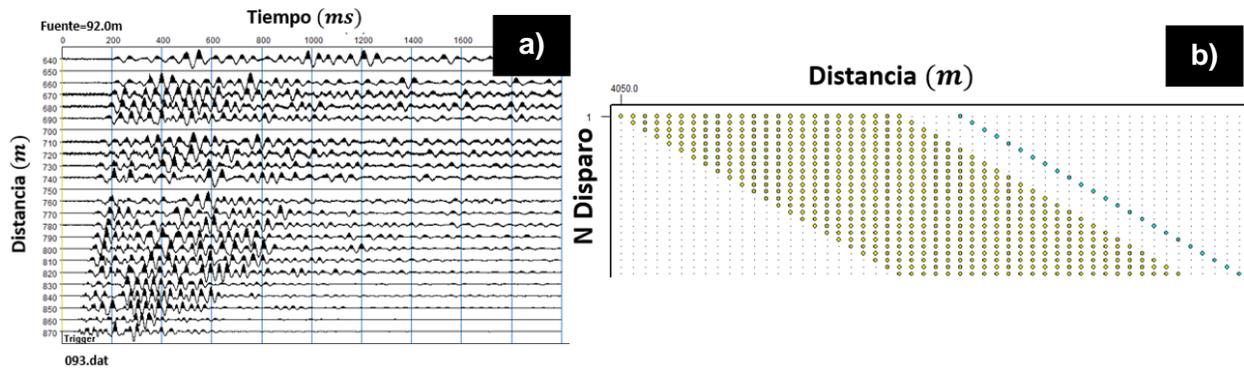
#### **2.1.2.1. Procesamiento**

El procesamiento de los datos sísmicos de MASW, consiste en la obtención de perfiles de la velocidad de la onda de corte,  $V_s$ , en función de la profundidad y se llevó a cabo usando el software SeisImager™, en el laboratorio de procesamiento de datos sísmicos del CICESE. El procedimiento se divide en dos etapas: 1) Análisis de las curvas de dispersión y 2) Inversión para obtener perfiles 2D de  $V_s$  con respecto a la profundidad.

- **Etapas 1. Análisis de las curvas de dispersión**

Esta etapa consiste principalmente en obtener las curvas de dispersión del perfil 1, los datos se cargan por segmentos, en formato SEG-Y. La secuencia para desarrollar esta etapa es la siguiente:

- 1. Edición de trazas:** Se eliminan las trazas que están siendo afectadas por el ruido ambiental o por problemas en la adquisición de los datos de campo, buscando siempre la mejor relación señal/ruido (Figura 32.a).
- 2. Geometría:** Asignar la geometría, es decir, las coordenadas en superficie o el orden consecutivo que llevan las fuentes y los geófonos en los registros sísmicos, así como el *offset* y la distancia entre los geófonos (Figura 32.b).



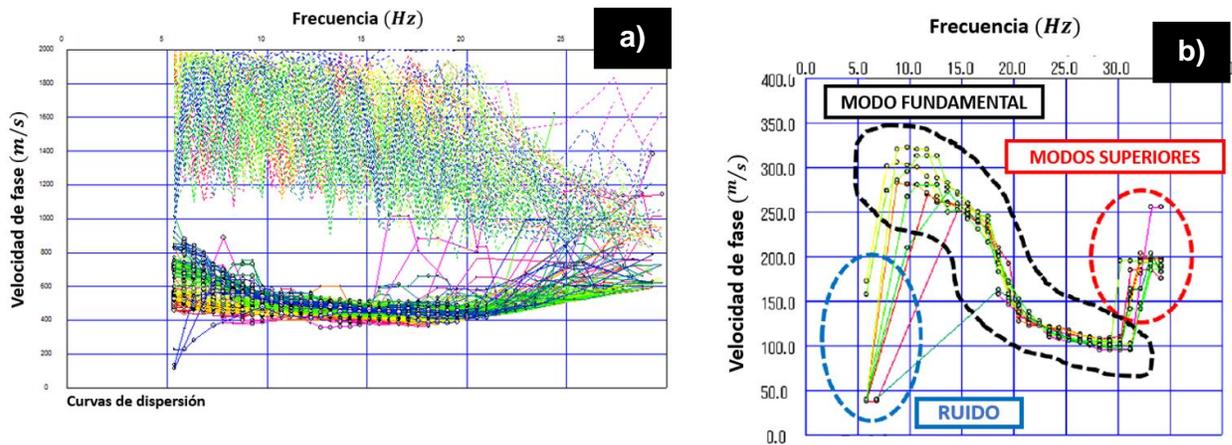
**Figura 32.** Edición de trazas y asignación de geometría. **a).** Registro sísmico de la fuente ubicada a 92 m. **b)** Asignación de la geometría, los círculos azules indican la posición de las fuentes y los círculos amarillos la posición de los geófonos.

**3. Calculo CMPCC (correlaciones cruzadas que tienen un CMP):** El método MASW puede considerarse esencialmente como una suma de correlaciones cruzadas de todas las trazas de la onda, dado que, para mejorar la resolución lateral, se usa las correlaciones cruzadas que tengan las mismas ubicaciones de CMP, es decir, CMPCC. Para aumentar el número de datos CMPCC, se usa un método de disparo múltiple y movemos los puntos de dispersión y disparo del receptor, por lo que se puede usar la misma información obtenida con el método de sísmica de reflexión 2D. El desarrollado del análisis CMPCC que se puede aplicar a los datos de MASW, se resume en lo siguiente (Hayashi y Suzuki, 2004):

- Calcular las correlaciones cruzadas para cada par de trazas y agrupar las correlaciones que tienen un mismo CMP.
- En cada CMP, las correlaciones cruzadas que tienen un espaciado igual se apilan en el dominio del tiempo, las que no, se ordenan con respecto a su espaciado, en cada CMP y esta recopilación de correlación cruzada resultante va a tener solamente información de las diferencias de fase en cada ubicación de CMP.
- El método MASW se aplica a las recopilaciones de CMPCC para calcular las velocidades de fase. Primero, cada traza se transforma en el dominio de la frecuencia utilizando la Transformada Rápida de Fourier. Luego, los datos del dominio de la frecuencia se integran sobre el espaciado con respecto a las velocidades aparentes. Así el CMPCC pasa del dominio x-t al dominio de la frecuencia c-f directamente, donde mediante el software se asignan los valores mínimos y

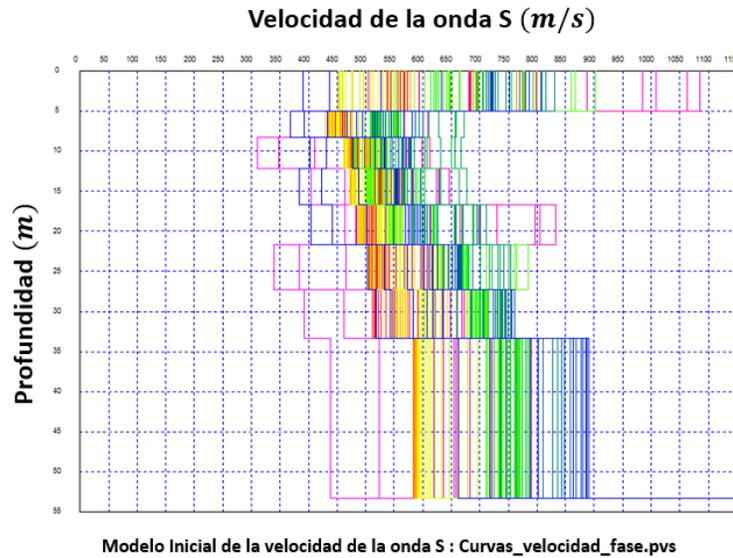
máximos de la velocidad de fase (0 a 2000) m/s y de la frecuencia (5 a 30) Hz, teniendo en cuenta las propiedades geológicas de la zona de estudio.

- Una vez que se obtiene CMPCC, se calculan las velocidades de fase a partir de la amplitud máxima en cada frecuencia y se pasa a la obtención de las curvas de dispersión.
- 4. Curvas de dispersión:** Se genera el grupo de curvas de dispersión para cada CMP en el módulo *WaveEq* de *SeisImager*<sup>TM</sup> (Figura 33. a), en este paso se debe seleccionar para cada una de las curvas el rango únicamente de la velocidad de fase más baja o del modo fundamental ( $M_0$ ) de la onda Rayleigh, despreciando los modos superiores y el ruido generado (Figura 33. b).



**Figura 33.** Curvas de dispersión. **a)** Grupo de curvas de dispersión de frecuencia de 5 a 30 Hz. **b)** Separación de los modos fundamentales, superiores y del ruido en las curvas de dispersión. Modificado de Hayashi (2003).

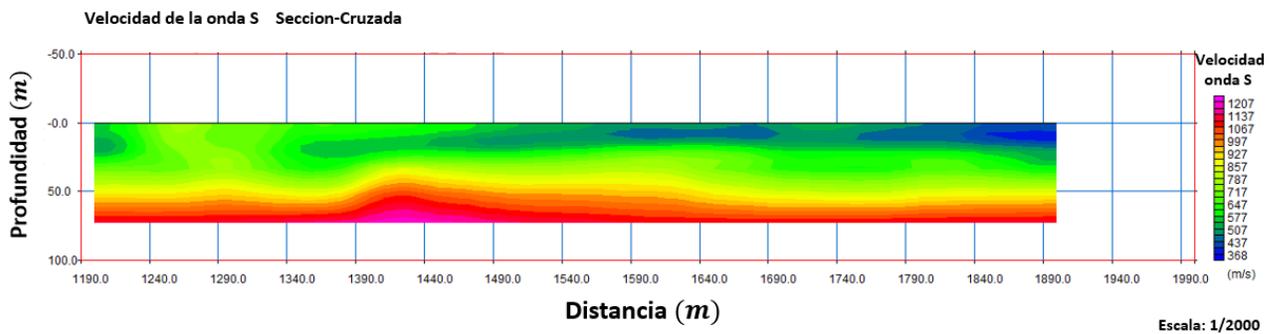
- 5. Modelo Inicial:** A partir de las curvas de dispersión se genera la inversión del modelo inicial de la velocidad de las ondas S, en el que se establecen el número de capas del modelo y la profundidad máxima, la cual fue estimada en 60 m, debido a la potencia de la fuente y las características litológicas de la zona. Los modelos iniciales se pueden visualizar de manera separada por cada CMP (Figura 34).



**Figura 34.** Conjunto de modelos iniciales de velocidades de la onda S, generados a partir de las curvas de dispersión.

- **Etapla 2. Perfiles de  $V_s$  1D y 2D**

Una vez que se ha generado el modelo inicial, se hace una inversión de los datos, usando el método de mínimos cuadrados iterativo (10 iteraciones), para disminuir el RMS calculado del modelo, con el fin de crear el perfil o modelo de velocidad  $V_s$  1D, al usar múltiples registros de campo obtenidos sucesivamente en diferentes ubicaciones a lo largo de una línea de levantamiento. Se generan múltiples perfiles de velocidad 1D de  $V_s$  para una misma línea, por lo que se sugiere utilizar el esquema de interpolación 2D para generar una sección transversal de  $V_s$  2D, la cual se puede visualizar en el módulo *GeoPlot* (Figura 35), en el eje  $x$  se ubica la localización en superficie de la fuente y en el eje  $y$  la profundidad máxima de 60 m.



**Figura 35.** Perfil 2D de la distribución de la velocidad de la onda S, de la línea 9 de MASW. Las velocidades de la onda S más baja está representadas por el color azul y las velocidades más altas por los colores rojos y fucsia.

## 2.2. Método gravimétrico

El método gravimétrico consiste en la medición de la aceleración de gravedad sobre el terreno con el fin de detectar anomalías o variaciones laterales de densidad de las unidades geológicas presentes en el subsuelo. La interpretación geológica de tales mediciones se realiza en términos de anomalías gravimétricas, en particular de la anomalía de Bouguer completa (Telford et al., 1991).

El principio del método gravimétrico se basa en la ley de la atracción gravitacional de Newton (Ecuación 16), la cual establece que la fuerza de atracción  $F$ , entre dos masas  $m_1$  y  $m_2$ , es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa,  $r'$  (Telford et al., 1991; Estrada, 2012).

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r'^2} \quad (16)$$

donde  $G$  es la constante de la gravitación universal:  $67 \times 10^{-11} (\text{Nm}^2)/(\text{kgs}^2)$ .

En el caso de la Tierra irrotacional con masa  $M$  y radio  $R$ , la fuerza  $F$  a una masa  $m$  sobre la superficie de la Tierra, estará definida como:

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad (17)$$

donde  $M$  es la masa de la Tierra  $5.976 \times 10^{27}$  g,  $r$  es el radio de la Tierra, el cual varía con la latitud, el signo negativo de  $g$  se debe a su dirección opuesta al vector  $\hat{r}$ . La tierra es achatada en los polos y alargada en el ecuador, es decir, hay una variación en el valor de  $r$  de la Tierra, por lo que, la gravedad en los polos es mayor que en el ecuador.

El valor de la gravedad a lo largo de la superficie terrestre, varía por la excentricidad del planeta, la heterogeneidad en la distribución de masa dentro del mismo y por la rotación sobre su eje (Telford et al., 1991). La unidad de la aceleración de la gravedad,  $g$ , son los Gales (Gal); 1 Gal equivale a  $1 \text{cm/s}^2$ , como las variaciones de la gravedad son tan pequeñas, equipos como el gravímetro, registran estas variaciones de las anomalías gravimétricas en el orden de miliGales (mGal).

Las anomalías gravimétricas son las variaciones de la gravedad observada o registrada,  $g_{obs}$ , con respecto a un valor teórico de referencia,  $g_{teo}$ . La gravedad observada está influenciada por diversos efectos sobre el punto de observación como: la latitud, altitud, topografía, mareas terrestres, ente otras, de manera que al valor de la gravedad observada se le aplican una serie de correcciones para que el valor anómalo de la gravedad refleje realmente las variaciones de la densidad en la corteza.

### 2.2.1. Correcciones gravimétricas

#### 2.2.2.1. Corrección por variaciones temporales

Las correcciones por las variaciones temporales involucran: 1) las variaciones ocasionadas por la deriva del instrumento y 2) las variaciones ocasionadas por la marea terrestre.

- 1) La deriva instrumental es producida por la fatiga o desgaste del sistema de piezas y resortes del instrumento de medición de la gravedad, lo que puede generar variaciones en las mediciones a lo largo del tiempo.
- 2) La Tierra ejerce una fuerza de atracción sobre los objetos cercanos a ella y a su vez estos cuerpos generan el mismo efecto sobre la Tierra, por lo que se producen deformaciones de la superficie de la Tierra, a este fenómeno se le conoce como mareas terrestres. Estas deformaciones generan cambios periódicos en la magnitud de la gravedad, dependiendo de la latitud y época del año en la que se está realizando la medición. Un ciclo de mareas terrestres representa un cambio en gravedad de alrededor de 0.2 o 0.3 mGal (Telford et al., 1991). El gravímetro Scintrex Autograv CG-5, tiene incorporado en su software la corrección por mareas terrestres, debido a los efectos producidos por la Luna y el Sol, basado en las ecuaciones propuestas por Longman (1959), ecuaciones 18 y 19 (Longman, 1959; Ortega-Estupiñán, 2014).

$$g_{mr} = g_m + g_s \quad (18)$$

$$g_{mr} = \frac{GM_L r}{D_L^3} (3 \cos^2 \theta - 1) + \frac{3 GM_L r^2}{2 D_L^4} (5 \cos^2 \theta - 3 \cos \theta) + \frac{GM_S r}{D_S^3} (3 \cos^2 \phi - 1) \quad (6)$$

donde  $g_{mr}$  es la componente vertical de la fuerza de marea, por unidad de masa, debida a la Luna y al Sol.  $g_m$  y  $g_s$  son las componentes verticales de la aceleración de la marea debido a la Luna y el Sol, respectivamente,  $M_L$  es la masa de la Luna,  $M_s$  es la masa del Sol,  $\theta$  es el ángulo del cenit a la Luna  $\Phi$  es el ángulo del cenit al Sol,  $D_L$  es la distancia entre el punto de observación y la Luna,  $D_s$  es la distancia entre el punto de observación y el Sol.

#### 2.2.2.2. Corrección por latitud

La corrección por latitud consiste en eliminar los efectos causados por la forma y rotación de la Tierra, el valor se determina con la Fórmula Internacional de la Gravedad, que depende solo del valor de la latitud en cada estación de medición y que está referenciada al esferoide, es posible calcularla, siempre y cuando se conozca el valor de la gravedad absoluta de la estación base. La ecuación adoptada por la Asociación Internacional de Geodesia en 1967 es:

$$g_{lat} = 978031.846[1 + 0.005278895 \sin^2(l) + 0.000023462 \sin^4(l)] \quad (207)$$

donde  $l$  representa la latitud de la estación.

#### 2.2.2.3. Corrección de aire libre

Cada una de las mediciones de la gravedad tomadas en campo están realizadas a diferentes alturas, y dado que la gravedad varía inversamente con el cuadrado de la distancia (Ecuación 17), el valor de la gravedad observada no será igual en cada punto de medición, así que es necesario eliminar esta variación, es decir, reducir todas las observaciones a un mismo nivel de referencia (nivel del mar o nivel arbitrario).

Considerando que la Tierra tiene un radio aproximado de 6367.5 km, la anomalía de aire libre en miliGales está expresada como:

$$g_{al} = g_{obs} - g_{teorica} + 0.308596h \quad (21)$$

donde  $h$  es la elevación de cada una de las estaciones y el valor de la gravedad observada,  $g_{obs}$ , ya ha sido corregido por las variaciones temporales y por la latitud.

#### 2.2.2.4. Corrección de Bouguer Simple

Cuando se aplica la corrección de aire libre no se considera las masas que existe entre el punto de medición y el plano de referencia. La corrección de Bouguer simple aproxima todas las masas a un plano de referencia, una losa homogénea de extensión lateral infinita, cuyo espesor equivale a la diferencia de las elevaciones entre las estaciones y el plano de referencia ( $h$ ). La ecuación de la losa homogénea, está definida como (Telford et al., 1991):

$$g_{loza} = 2\pi G\sigma_B h \quad (22)$$

donde  $\sigma_B$  es la densidad de Bouguer. Cuando el plano de referencia es el nivel del mar se establece que  $\sigma_B = 2.67 \text{ g/cm}^3$ , que es un valor promedio de la densidad de la corteza continental, entonces la ecuación para calcular esta corrección es:

$$\Delta g_B = 0.1119 * h(mGal) \quad (23)$$

Entonces la anomalía de Bouguer simple está definida como:

$$g_B = g_{obs} - g_{teo} \pm g_{al} \mp \Delta g_B \quad (24)$$

### 2.2.2.5. Corrección topográfica

En la corrección de Bouguer no se considera el relieve topográfico del terreno, en el caso en el que la masa se encuentre por encima de la estación, la placa de Bouguer sobresale y produce una componente de atracción ascendente que reduce la atracción gravitacional, uno de los métodos más usado para realizar esta corrección es la plantilla de Hammer, que toma como base el mapa topográfico regional de la zona y lo divide en sectores circulares concéntricos. El efecto de la gravedad de cada segmento se calcula por medio de la ecuación (Telford et al., 1991):

$$g_{top} = G\sigma\theta \left\{ r_2 - r_1 + \sqrt{r_1^2 + \Delta Z^2} - \sqrt{r_2^2 + \Delta Z^2} \right\} \quad (25)$$

donde  $r_1$  y  $r_2$  son los radios interior y exterior del sector circular,  $\theta$  es el ángulo (en radianes) subtendido por el sector;  $\sigma$  la densidad.

### 2.2.2.6. Corrección móvil o de Eötvös

Esta corrección se aplica solo en el caso en el que la medición se haya realizado en un vehículo en movimiento (avión o barco). Si el vehículo se mueve de W a E, la velocidad angular es mayor, por lo tanto, la gravedad va a disminuir con respecto a que si se tomara una estación fija en tierra. La ecuación para calcular esta corrección es la siguiente:

$$g_{mov} = 7.503V \cos(\lambda) \sin(\alpha) \quad (2.26)$$

donde  $\lambda$  es la latitud,  $\alpha$  es el ángulo de movimiento del vehículo respecto al Norte geográfico.

- **Anomalía de Bouguer completa (ABC)**

La anomalía de Bouguer completa se obtiene al aplicar las correcciones a los valores de gravedad observada, incluyendo la corrección topográfica, a diferencia de la anomalía de Bouguer simple. La ABC está definida por la siguiente ecuación:

$$g_{ABC} = g_{obs} \pm C_{temp} - C_{lat} \pm C_{al} \pm C_B + C_{top} + C_{mov} \quad (2.27)$$

donde:

- $g_{obs}$  = Gravedad observada.
- $C_{temp}$  = Corrección por variaciones temporales.
- $C_{lat}$  = Corrección por latitud.
- $C_{al}$  = Corrección de aire libre.
- $C_B$  = Corrección de Bouguer simple.
- $C_{top}$  = Corrección topográfica.
- $C_{mov}$  = Corrección móvil o de Eötvös.

La anomalía de Bouguer completa refleja la distribución de masas de diferentes densidades que generan fronteras o contrastes y se muestran como anomalías de densidad. Las fuentes de las anomalías pueden ser de carácter regional, debido a las características de la estructura geológica más profunda, como el basamento, o de carácter residual o local debido a fuentes intermedios o superficiales (Ortega-Estupiñán, 2014). El desarrollo del método gravimétrico se divide en tres etapas: Adquisición, Procesamiento e Interpretación de los datos.

### 2.2.2. Adquisición

Los datos gravimétricos se adquirieron durante la campaña de adquisición de datos geofísicos del proyecto número 2016-01-2188 del CONACYT, que se llevó a cabo en noviembre de 2018, dentro y al norte del CGLTV, Baja California Sur. Las mediciones gravimétricas se realizaron usando el gravímetro automático

Scintrex Autograv CG-5 (Figura 36. a), el cual realiza mediciones relativas de la gravedad, es decir que mide la diferencia de la gravedad de una estación a otra. Los gravímetros tienen incorporado un sistema de resorte que soporta una masa de prueba, cuando la gravedad cambia, la fuerza sobre la masa cambia y este cambio se ve reflejado en un cambio en la longitud del resorte. El gravímetro Scintrex tiene una precisión de 3  $\mu\text{Gal}$  y exactitudes menores a 5  $\mu\text{Gal}$  (SCINTREX, 2012).

Los datos de posicionamiento satelital, se tomaron con el equipo de GPS Topcon GR-5 (Figura 33. b), el cual tiene una precisión de hasta 10 mm, es importante usar un excelente equipo GPS, ya que las variaciones en las elevaciones afectan directamente las anomalías gravimétricas. Los equipos de mediciones gravimétricas y GPS, usados en la tesis son propiedad del Departamento de Geofísica Aplicada del CICESE.



**Figura 36.** Equipos de medición de datos gravimétricos. **a)** Gravímetro: Scintrex Autograv CG-5. **b)** Equipo GPS: Topcon GR-5.

Para realizar un correcto levantamiento de los datos gravimétricos en campo, se debe tener en cuenta las siguientes generalidades:

- Calibrar el gravímetro y actualizar algunos parámetros referentes a la zona de estudio antes de comenzar la adquisición de datos en campo. En la Tabla 2, se muestran los principales parámetros.

**Tabla 2.** Parámetros de adquisición de datos gravimétricos.

PARÁMETROS	VALORES
Gravimetro	Scintrex Autograv CG-5
Equipo GPS	Topcon GR-5
Tiempo	Tiempo-Hora Universal
Longitud (Coordenadas Geográficas)	27.5 N
Latitud (Coordenadas Geográficas)	112.5 W
Zona UTM	12
Deriva (Drift)	0.887

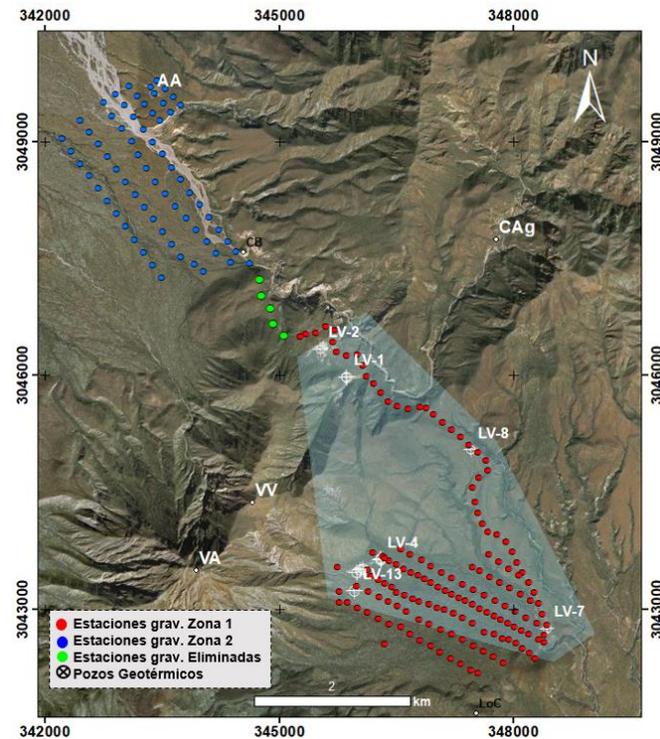
- Definir una estación de referencia gravimétrica del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), cercana a la zona de estudio, para convertir los valores relativos de gravedad medido en campo en valores de gravedad absoluta.
- Definir la estación base en la zona de estudio, en la cual se van a realizar mediciones de 60 s, antes y después de comenzar el trabajo de campo cada día, con el fin de poder determinar la variación de la gravedad durante el día, la cual no debe ser mayor a 100 mGal.

En cada una de las estaciones de medición de datos gravimétricos: Primero se tomaron varias mediciones de 30 s, hasta que dos o tres de las mediciones tomadas sean cercanas. Segundo, se mide la posición y altitud exacta de cada una de las estaciones, usando el equipo GPS, en el modo RTK (*Real Time Kinematic*), donde una sola estación de referencia proporciona correcciones en tiempo real, obteniendo una exactitud submétrica.

La adquisición de datos gravimétricos, se dividió en dos zonas; debido a que no se pudo tomar una sola estación base que cubriera el proyecto completo (Figura 37):

- La Zona 1, está dentro del CGLTV, la separación entre estaciones fue de 100 m a 150 m, la separación entre líneas de 400 m y se tomaron en total 154 mediciones.
- La Zona 2, está en la parte norte del CGLTV, cerca de la manifestación hidrotermal Agua Agria; la separación entre estaciones fue de 150 m, la separación entre líneas de 400 m y se tomaron en total 74 mediciones, sin embargo, las mediciones en las estaciones marcadas con puntos verdes,

estuvieron muy ruidosas, por lo que no se tomaron en cuenta durante el procesado de los datos gravimétricos.



**Figura 37.** Estaciones gravimétricas dentro y en la parte norte del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV). Círculos rojos -Zona 1. Círculos azules-Zona 2. Círculos verdes-Estaciones gravimétricas eliminadas. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. AA. Manifestación Agua Agrida.

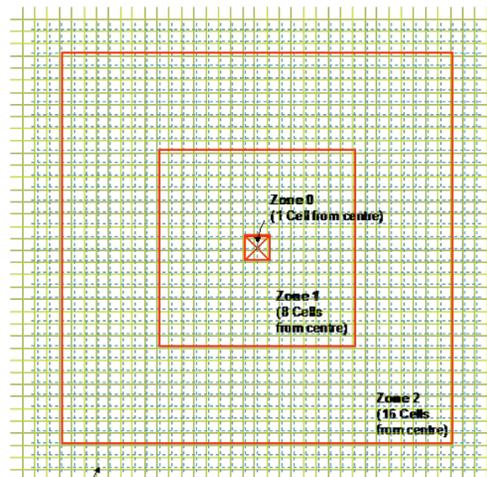
### 2.2.3. Procesamiento

El objetivo de procesar los datos gravimétricos consiste en obtener los mapas de anomalías gravimétricas que permitan caracterizar la zona de estudio y de definir modelos bidimensionales del subsuelo, a partir, de la información geológica, geofísica y de pozos exploratorios. El procesamiento, se llevó a cabo usando el software *Oasis Montaj* de la compañía Geosoft y se dividió en las siguientes etapas:

1. **Obtención de los datos GPS:** El Topcon GR5 proporciona un archivo con la información de las coordenadas geográficas y las alturas ortométricas de cada uno de los puntos de medición.
2. **Determinar la gravedad observada:** Las mediciones que proporciona el gravímetro Scintrex deben referenciarse a una base o estación geodésica de datos de gravedad absoluta del INEGI cercana a la zona de estudio y se tiene en cuenta las lecturas realizadas en la base del proyecto al inicio y

final de la jornada diaria de trabajo, con las cuales se realiza la corrección por deriva y se obtiene los valores reales de la gravedad observada,  $g_{obs}$ . La estación de referencia del INEGI es la denominada BNEE90 y el valor de gravedad de referencia es 979007.6590 mGal. Una vez que se obtiene el valor de la gravedad observada de las dos zonas de estudio (Figura 37), se juntan para trabajar la base de datos como un solo proyecto.

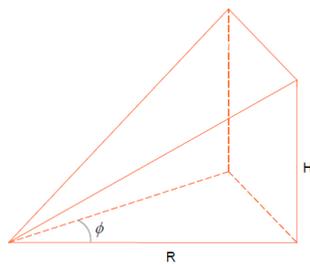
3. **Corrección topográfica:** Para realizar la corrección topográfica se debe tener el DEM regional (Modelo Digital de Elevación) de la zona de estudio y a partir de los datos de elevación tomados en campo generar el DEM local. La corrección topográfica se realizó usando el módulo *Terrain Correction* del software Oasis Montaj, este módulo utiliza la combinación de los métodos descritos por Kane (1962) y Nagy (1966), en el que se disponen los datos de los DEM regional y local en una malla (Figura 38), en la que el punto central es la estación y se calcula la contribución que le realizan 3 zonas diferentes, la zona cercana, zona intermedia y la zona lejana (Geosoft Oasis Montaj, 2010).



**Figura 38.** Malla usada para calcular el valor de la corrección topográfica en el punto central, propuesta por Kane (1962) y Nagy (1966). Modificado de Geosoft Oasis Montaj (2010).

A continuación, se muestra las ecuaciones usadas para calcular la corrección del terreno y la contribución que genera cada una de éstas zonas (Geosoft Oasis Montaj, 2010; García Fiscal, 2013).

- **Zona Cercana:** Se divide en prismas triangulares para la corrección cercana (0 a 2 km) (Figura 39). La región más próxima a la estación se divide octantes y se define con la siguiente ecuación:

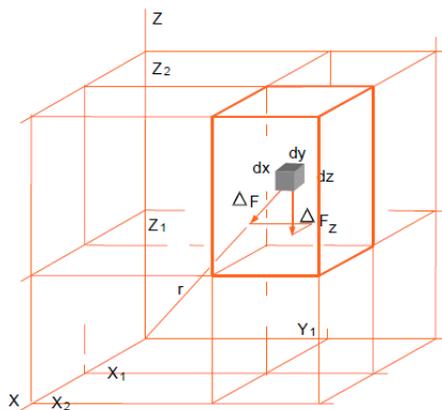


$$g = GD\phi \left( R - \sqrt{R^2 + H^2} + \frac{H^2}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right)$$

(28)

**Figura 39.** Prisma para la zona cercana de la corrección topográfica con el método por Kane (1962) y Nagy (1966). Modificado de Geosoft Oasis Montaj (2010).

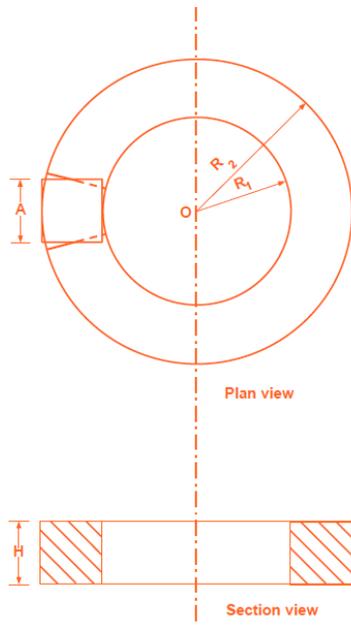
- **Zona intermedia:** Prismas rectangulares para la corrección intermedia (2 a 10 km) (Figura 40): Los vértices de los prismas son los nodos de la malla del DEM y las longitudes de las aristas son la diferencia entre las coordenadas de los puntos, el programa calcula la masa y el efecto gravitacional, se define con la siguiente ecuación:



$$g = -GD \left| \begin{array}{c} z_2 | y_2 | x_2 \\ z_1 | y_1 | x_1 \end{array} \right| x \bullet \ln(y + R) + y \bullet \ln(x + R) + Z \arctan \frac{Z \bullet R}{x \bullet y} \left| \right| \left| \right| \quad (29)$$

**Figura 40.** Prisma para la zona intermedia de la corrección topográfica con el método por Kane (1962) y Nagy (1966). Modificado de Geosoft Oasis Montaj (2010).

- **Zona lejana:** Segmentos de anillo para la corrección lejana (10 a 40 km) (Figura 41). A las estructuras del relieve más lejanas se les aproxima con segmentos de un anillo, la ecuación para la zona cercana está definida como:



$$g = 2GDA^2 \frac{(R_2 - R_1 \sqrt{R_1^2 + H^2} - \sqrt{R_2^2 + H^2})}{(R_2^2 - R_1^2)} \quad (30)$$

donde  $g$  es la atracción gravitacional del prisma,  $G$  es la constante de gravitación universal,  $D$  es la densidad,  $A$  es la longitud horizontal del lado del prisma,  $R_1$  es el radio interno del cilindro,  $R_2$  es el radio externo del cilindro,  $H$  es la altura de la sección del cilindro.

**Figura 41** Prisma de la zona lejana para la corrección lejana de la corrección topográfica con el método por Kane (1962) y Nagy (1966). Modificado de Geosoft Oasis Montaj (2010).

- 4. Obtener la anomalía de Bouguer completa:** La anomalía de Bouguer simple se obtiene gracias al módulo *Free Air, Bouguer Anomaly* del software Oasis Montaj. Este módulo realiza el cálculo de:
- 1) La corrección por latitud (Ecuación 20),
  - 2) La corrección por aire libre, descritas en la sección anterior, además tiene en cuenta parámetros como: la gravedad observada (absoluta), la corrección topográfica, la densidad del agua, hielo y tierra y la corrección por la curvatura de la Tierra con los que finalmente se obtiene el valor de la anomalía de Bouguer simple, mediante la siguiente ecuación (Geosoft Oasis Montaj, 2010):

$$g_B = g_{al} - 0.0419088[\rho h_s + (\rho_w - \rho)h_w + (\rho_l - \rho_w)h_l] + g_{curv} \quad (318)$$

donde:

- $g_B$  = Anomalía de Bouguer.
- $g_{al}$  = Anomalía de aire libre.
- $\rho$  = Densidad promedio del terreno,  $2.67 \text{ g/cm}^3$ .

- $\rho_w$  = Densidad promedio del agua,  $1 \text{ g/cm}^3$ .
- $\rho_l$  = Densidad promedio del hielo,  $0.9168 \text{ g/cm}^3$ .
- $h_s$  = Elevación de la estación en metros.
- $h_w$  = Profundidad del agua en metros.
- $h_i$  = Espesor del hielo en metros.
- $g_{curv}$  = Corrección por curvatura.

Una vez que se calculado la anomalía de Bouguer simple, el programa calcula automáticamente la anomalía de Bouguer completa, teniendo en cuenta la corrección topográfica.

$$g_{ABC} = g_B + g_{top} \quad (32)$$

- 5. Generación de los mapas de anomalías gravimétricas:** Los mapas de anomalías gravimétricas se realizan con el fin de identificar los contrastes de densidades. Una vez que se obtiene la anomalía de Bouguer completa, se representan los datos en mapas generados por un interpolador usando el método de mínima curvatura, en el módulo *Gridding* del software Oasis Montaj. Los principales mapas de anomalías gravimétricas son:
- **Mapa de la anomalía de Bouguer completa:** En el que se representa la ABC local calculada.
  - **Mapa de la anomalía residual:** La anomalía completa de Bouguer es la suma de dos componentes: efecto regional, que corresponde a las masas profundas y lejanas y el efecto residual debido a las masas intermedias a superficiales (estratos geológicos con mayor o menor densidad que las rocas circundantes). La anomalía gravimétrica es la superposición de efectos profundos (longitudes de onda largas), así como efectos superficiales (longitudes de onda corta), por lo que dependido del objetivo del estudio se hace una separación de estas contribuciones.
  - **Mapa de señal analítica:** El análisis e interpretación de la anomalía de la señal analítica en datos de gravedad, permite identificar la profundidad de las fuentes anómalas gravimétricas, sobre todo en el caso de interpretación de la anomalía magnética, los máximos de la señal analítica tienen la propiedad de mostrar directamente las fallas y los contactos, independientemente de las estructuras (Saibi et al., 2012).

- **Mapa de derivadas verticales:** La componente vertical de la gravedad, es justamente la cantidad medida por gravímetros y péndulos, por lo que el mapa de derivadas verticales permite destacar los valores de alta frecuencia o de baja longitud de onda, debidas generalmente a fuentes someras que quedan enmascaradas por las anomalías de larga longitud de onda. La primera derivada vertical permite resaltar las anomalías asociadas a las fuentes geológicas más superficiales. La segunda derivada vertical es una transformación matemática basada en la ecuación de Laplace que tiende a enfatizar las anomalías geológicas más pequeñas y menos profundas (longitudes de onda corta) a expensas de las características regionales más grandes. En las derivadas verticales, cuanto mayor sea el orden, mayor es la amplificación relativa de frecuencias más altas y mayor es el riesgo de acentuar el ruido a un nivel inaceptable. Por esta razón, derivadas verticales de tercer orden y por encima casi nunca se calculan (Elkins, 1951).
  
  - **Mapa de gradiente horizontal:** Este método es el menos susceptible al ruido en los datos gravimétricos, porque solo requiere el cálculo de las dos derivadas horizontales de primer orden del campo. El método permite delinear las fuentes tanto superficiales como profundas, en comparación con el método de gradiente vertical que es útil solo para identificar estructuras menos profundas (Phillips, 2000).
- 6. Modelos verticales bidimensionales del subsuelo:** A partir de la respuesta de la gravedad observada se construye un modelado bidimensional (x,z) de modelos gravimétricos del subsuelo. Es importante aclarar que el modelo del subsuelo obtenido no es único, ni lineal, ya que varios modelos pueden reproducir la misma respuesta de la gravedad observada, debido a la no unicidad del método; para lograr un mejor ajuste, se debe tener en cuenta toda la información disponible de la zona: geológica, geoquímica, geofísica, estructural y de pozos exploratorios, de manera que se pueda constreñir el modelo del subsuelo y se minimice las diferencias entre la anomalía calculada y la observada. El modelo de inversión se realiza en el módulo GM-SYS del programa Oasis Montaj de Geosoft v.6.4.2, el cual utiliza los métodos de Talwani et al., 1959, para calcular el modelo de la gravedad y considera un modelo bidimensional de tierra, en el que cada unidad estructural o bloque se extiende hasta más de 30.000 km a lo largo del perfil y permita eliminar los efectos de borde y supone que la tierra tiene variación topográfica, pero no curvatura (Northwest Geophysical Associates, 2004).

## Capítulo 3. Resultados

---

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la adquisición y procesamiento de los métodos sísmicos (reflexión y MASW) y del método gravimétrico aplicados dentro y fuera del CGLTV.

### 3.1. Métodos Sísmicos

#### 3.1.1. Sísmica de reflexión

En esta sección se presenta la interpretación geológica de dos perfiles de sísmica de reflexión adquiridos dentro del CGLTV.

##### 3.1.1.1. Perfiles sísmicos

###### Perfil sísmico 1.

Tiene una orientación NW-SE, una longitud de aproximadamente 5.5 km y una profundidad máxima en términos de tiempo de viaje doble (*TWTT*) de  $\approx 800$  ms (Figura 42). La diferencia topográfica entre el punto más bajo y el más alto del perfil es aproximadamente 500 m, cerca de este perfil se encuentran distribuidos los pozos LV-1, LV-2, LV-8 y LV-7 del CGLTV (Figura 4).

Se identificaron dos secuencias sísmicas limitadas por sismorefltores de amplitudes diferentes: 1) La secuencia C1, de reflectores con amplitudes altas, la cual alcanza profundidades entre 300 y 500 ms (*TWTT*) y el espesor va disminuyendo hacia el SE; esta secuencia está relacionada con el grupo Complejo Volcánico. 2) La secuencia C2, caracterizada por los reflectores de amplitudes bajas (señal difusa) a profundidades mayores de los 500 ms, se correlaciona con la Formación Santa Lucía, reportada en la descripción litológica de los pozos perforados del CGLTV.

Se destaca un sistema de fallas, que se extienden desde la secuencia C1 hasta C2. La profundidad mínima de investigación alcanzada por la imagen sísmica, tanto en el perfil 1 como en el 2, fue  $\approx 100$  ms (*TWTT*),

por lo que no se puede establecer si las fallas se extienden hacia la superficie, la profundidad máxima alcanzada por las fallas es de 600 ms, pero debido a la calidad de la imagen sísmica, no se puede determinar si las fallas tienen continuidad a profundidad.

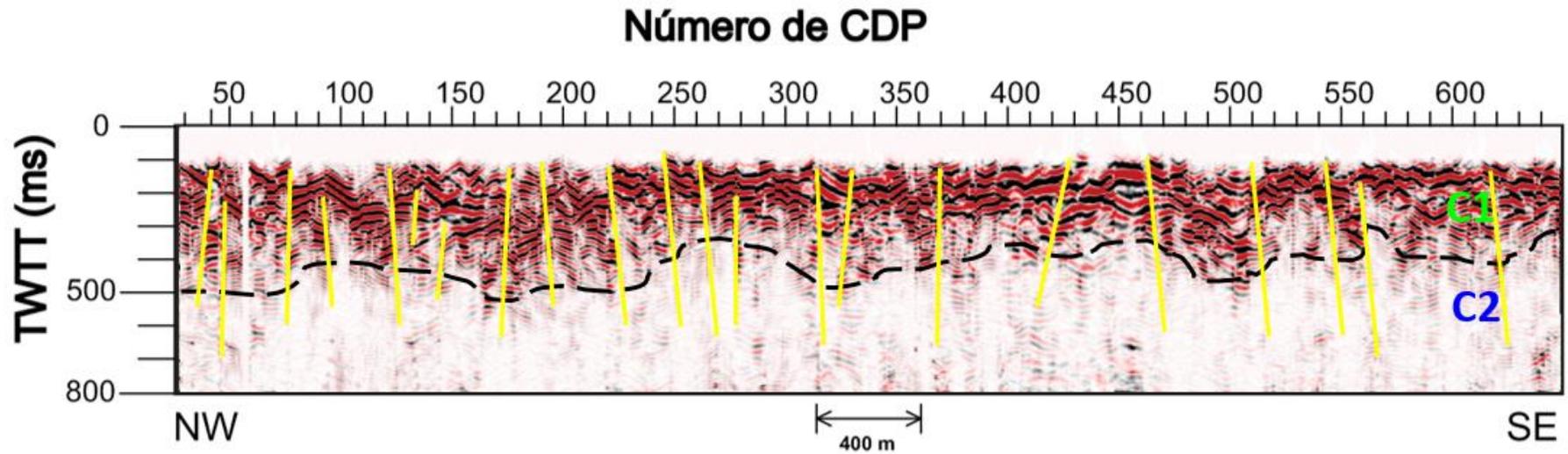
### **Perfil sísmico 2.**

Tiene una longitud de aproximadamente 1.1 km y una profundidad máxima *TWTT* de  $\approx 800$  ms (Figura 43), el levantamiento sísmico se realizó de SE a NW (dentro del CGLTV) y está afectado por una diferencia topográfica entre el punto más bajo y el más alto de aproximadamente 50 m.

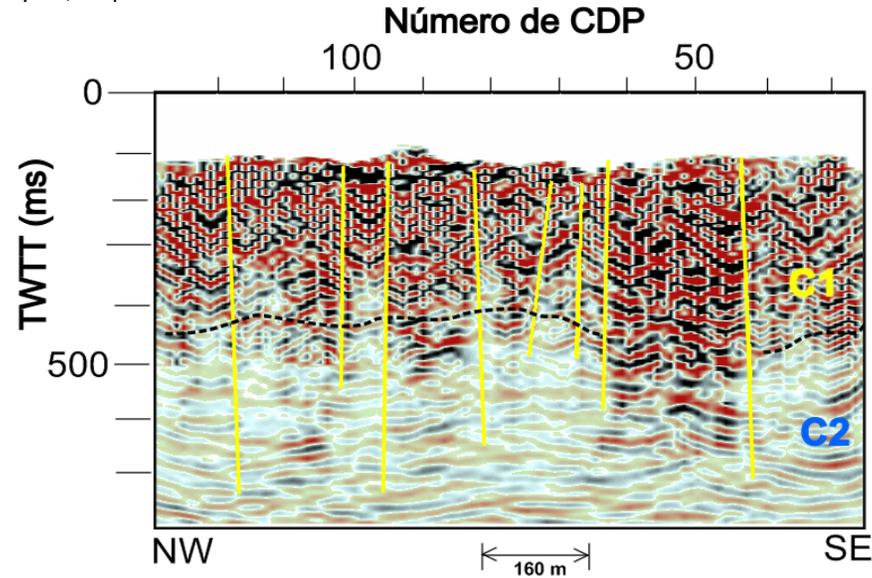
Al igual que en el perfil 1, se determinan dos secuencias sísmicas limitadas por sismorefltores de amplitudes diferentes: 1) La secuencia C1, de reflectores con amplitudes altas, relacionada con el Grupo Complejo Volcánico que alcanza profundidades de 400 ms (*TWTT*) y el espesor de la capa se mantiene constante. A diferencia del perfil 1, los reflectores de C1 se ven ondulados debido a las dimensiones y resolución de la imagen sísmica. 2) La secuencia C2, de reflectores más alargados y de amplitudes bajas, se asocia a la Formación Santa Lucía.

El sistema de fallas del perfil 2, alcanza profundidades máximas de 700 ms (*TWTT*). La velocidad de propagación de las ondas tanto en el perfil 1 y 2, varían en promedio desde 500 m/s, en la parte superficial, hasta aproximadamente 2500 m/s en la porción más profunda.

El sistema de fallas que se observa en el perfil 1 y 2 está asociado a la apertura del Golfo de California durante la etapa de deformación regional del CVLTV, los cambios en la orientación de los esfuerzos ocasionaron zonas de debilidad en diferentes direcciones y en el Cuaternario formaron y reactivaron el sistema tectónico NE-SW (Prol-Ledesma et al., 2016). Por lo anterior, el sistema de fallas funciona como una zona de debilidad mecánica, a través de la cual ascienden los fluidos hidrotermales dentro del CGLTV. Los fluidos hidrotermales se comportan como ventilas verticales de agua caliente, ligadas a la actividad volcánica remanente y afectan las propiedades físicas de las rocas, entre ellas, la atenuación y velocidad de propagación de las ondas; en las imágenes sísmicas se identifican por la pérdida de coherencia, continuidad lateral y amplitud en los sismo-refltores, lo cual se observa en la secuencia C1 y principalmente en la secuencia C2. Debido a la calidad de las imágenes sísmicas, no fue posible interpretar más horizontes sismoestratigráficos, que nos pudieran dar mayor detalle del comportamiento estructural del subsuelo a profundidad.



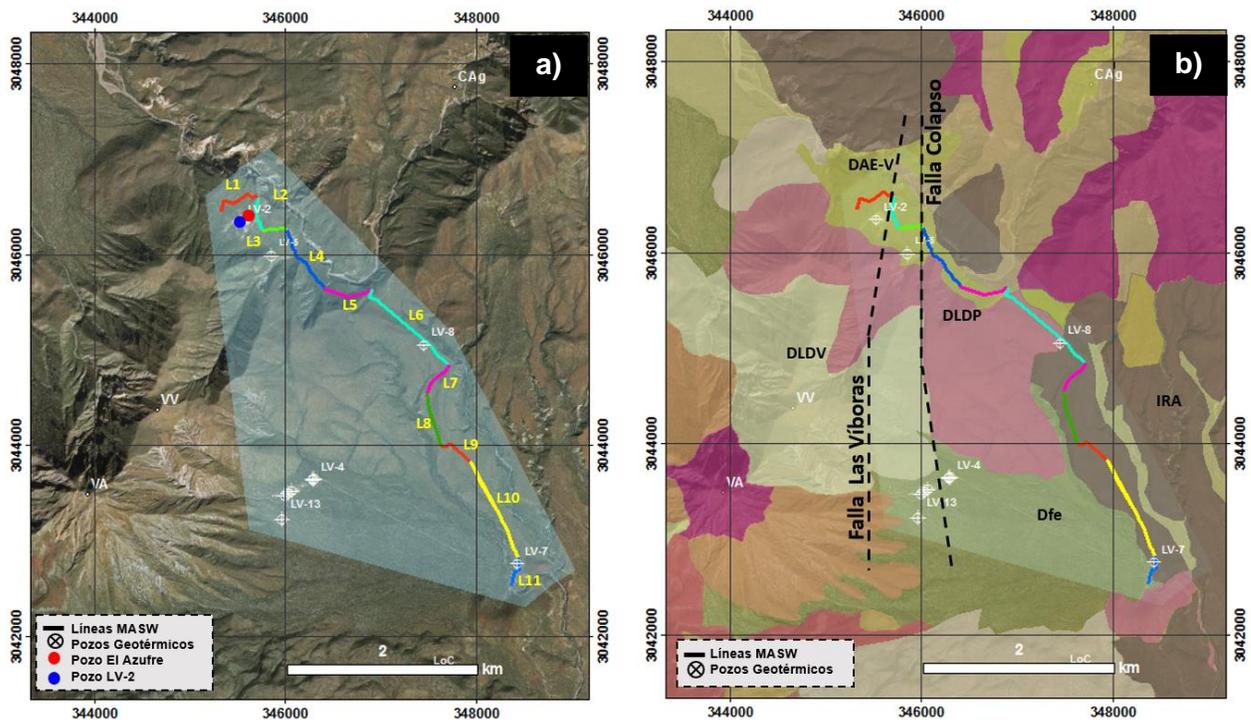
**Figura 42.** Perfil sísmico de reflexión 1. Las líneas amarillas representan las posibles fallas interpretadas; la línea punteada negra indica el cambio de amplitudes altas y bajas, correspondientes a las secuencias C1 y C2, respectivamente.



**Figura 43.** Perfil sísmico de reflexión 2. Las líneas amarillas representan las posibles fallas interpretadas; la línea punteada negra indica el cambio de amplitudes altas y bajas, correspondientes a las secuencias C1 y C2, respectivamente.

### 3.1.1. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del análisis de la propagación de las ondas superficiales del perfil 1 (Figura 22), aplicando la metodología descrita en el capítulo anterior. Durante el desarrollo del procesamiento de los datos sísmicos, se concluyó que en las zonas en las que hay un cambio abrupto en la dirección del tendido de los geófonos, se genera un claro aumento de los valores de la velocidad de la onda superficiales ( $V_s$ ) con respecto a la profundidad. Esto se debe principalmente a que al no estar los geófonos dispuestos en la superficie de manera equidistante y de forma lineal, se realiza inadecuadamente el cálculo de los CMP de la línea sísmica y por lo tanto de las curvas de dispersión de las ondas superficiales; razón por la cual se dividió el perfil 1 en 11 líneas cortas (Figura 44), para evitar al máximo los cambios de dirección del tendido de los geófonos y por lo tanto los cálculos erróneos de la  $V_s$ .



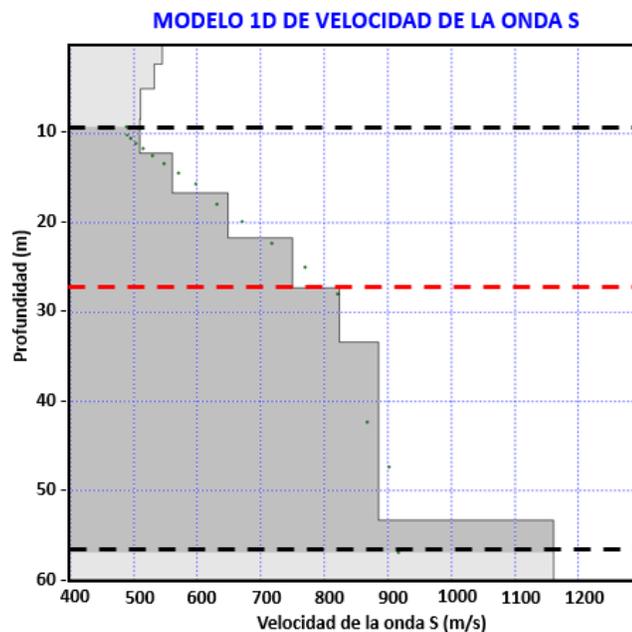
**Figura 44. a)** Mapa del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV) en el que se representa: las 11 líneas en las que se dividió el perfil 1 de sísmica, la ubicación de los pozos y geometría del campo geotérmico, el punto rojo indica la ubicación del pozo somero El Azufre y el azul la ubicación del pozo LV-2. **b)** Mapa geológico superficial del área de estudio y ubicación de las principales fallas que cortan el perfil 1. Dfe: Flujo de escombros. DLPD: Depósitos de Lava Dacíticos La Puerta. DAE-V: Avalancha de escombros Aguajito. IRA: Ignimbrita Riolítica Aguajito. Modificado de Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013).

A partir del análisis de la propagación de las ondas superficiales de cada una de las once líneas de MASW, se construyeron los modelos 1D y secciones transversales 2D de la  $V_s$ .

### 3.1.1.1. Modelos 1D

Una vez que se selecciona el modo fundamental de las curvas de dispersión, se crea la inversión del modelo inicial, al que se le asigna un número de 10 capas y una profundidad máxima de investigación de  $Z_{\max}=50$  m, la cual está definida por la relación:  $Z_{\max} \leq x_1$ , donde  $x_1$ , es la distancia del offset cercano o de la fuente al geófono más cercano, en este caso de 50 m (Park et al., 1999; Socco y Scrobbia, 2004). A partir de la construcción del modelo inicial, se calcula la inversión de los datos con un máximo 10 iteraciones, con el fin de disminuir el RMS de la inversión, sin llegar a sobre estimar el modelo; el RMS alcanzado para todos los modelos se mantuvo en un rango de 2.5% a 5% y al finalizar el proceso iterativo, se generan una serie de modelos 1D de  $V_s$  por cada CMP pertenecientes a una sola línea.

En la Figura 45, se presenta el modelo 1D de  $V_s$  de la línea 2, ubicado a 730 m de distancia desde el inicio del perfil 1. El modelo tiene una profundidad mínima de 9 m y máxima de 57 m, representada por la zona de color gris oscura, la  $V_s$  aumenta con la profundidad desde 520 m/s hasta 1620 m/s. Entre los 10 m y los 22 a 27 m, existe un rango de velocidad S que varía entre 520 y 740 m/s, definido por una mayor dispersión de valores calculados de  $V_s$  a menores profundidades (puntos verdes); por debajo de esta capa se encuentra una secuencia con  $V_s > 740$  m/s, que alcanza los 57 m de profundidad, que se construye con menos valores calculados de la  $V_s$ . En general, la profundidad mínima alcanzada por los modelos 1D del perfil 1, fue de 7 m y profundidad máxima de 60 m.



**Figura 45.** Modelo 1D de la velocidad de la onda S de la línea 2, a 730 m de distancia del primer punto de medición del perfil sísmico. La zona gris indica el rango de profundidad interpretable con el método MASW. La línea roja representa la separación entre las dos secuencias interpretadas.

### 3.1.1.2. Modelos 2D

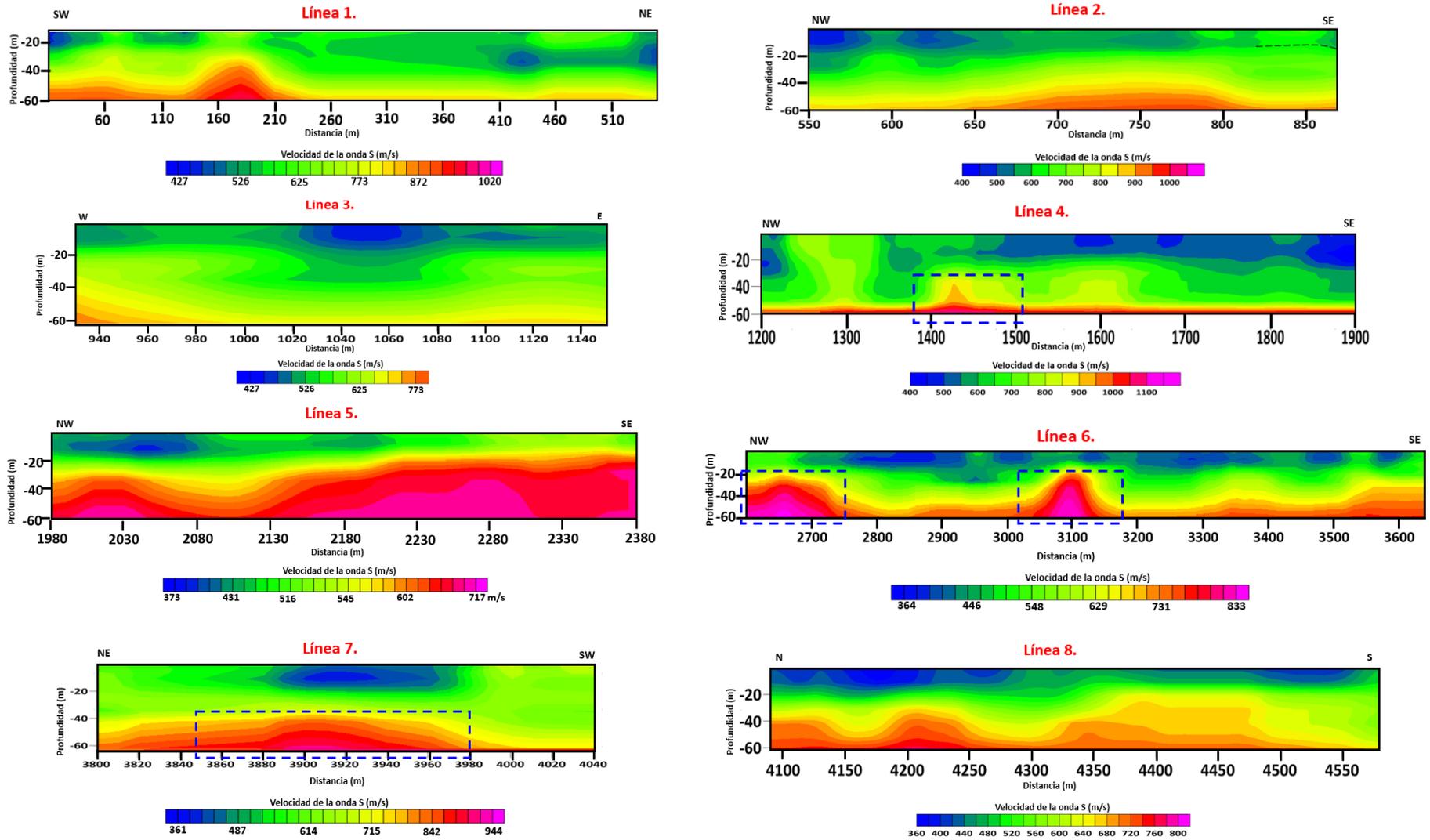
A partir de los perfiles de velocidad de onda de corte  $V_s$  1D, se aplica un esquema de interpolación 2D para generar una sección transversal de velocidad  $V_s$  2D o modelo 2D, que representan las variaciones de la velocidad de la onda S con respecto a la profundidad.

En la Figura 46, se muestra el conjunto de modelos 2D de  $V_s$ , de cada una de líneas en los que se dividió el perfil 1. Cada uno de los modelos tiene una propia escala relativa de colores: las tonalidades azules representan las bajas  $V_s$ , mientras que los colores rojo y fucsia, representa los valores altos de  $V_s$ , los modelos no incluyen las variaciones de la elevación del terreno, debido a que afectaban la representación de la  $V_s$  con respecto a la profundidad. De manera generalizada, en los modelos 2D, se observan 3 zonas con diferentes rangos de  $V_s$ :

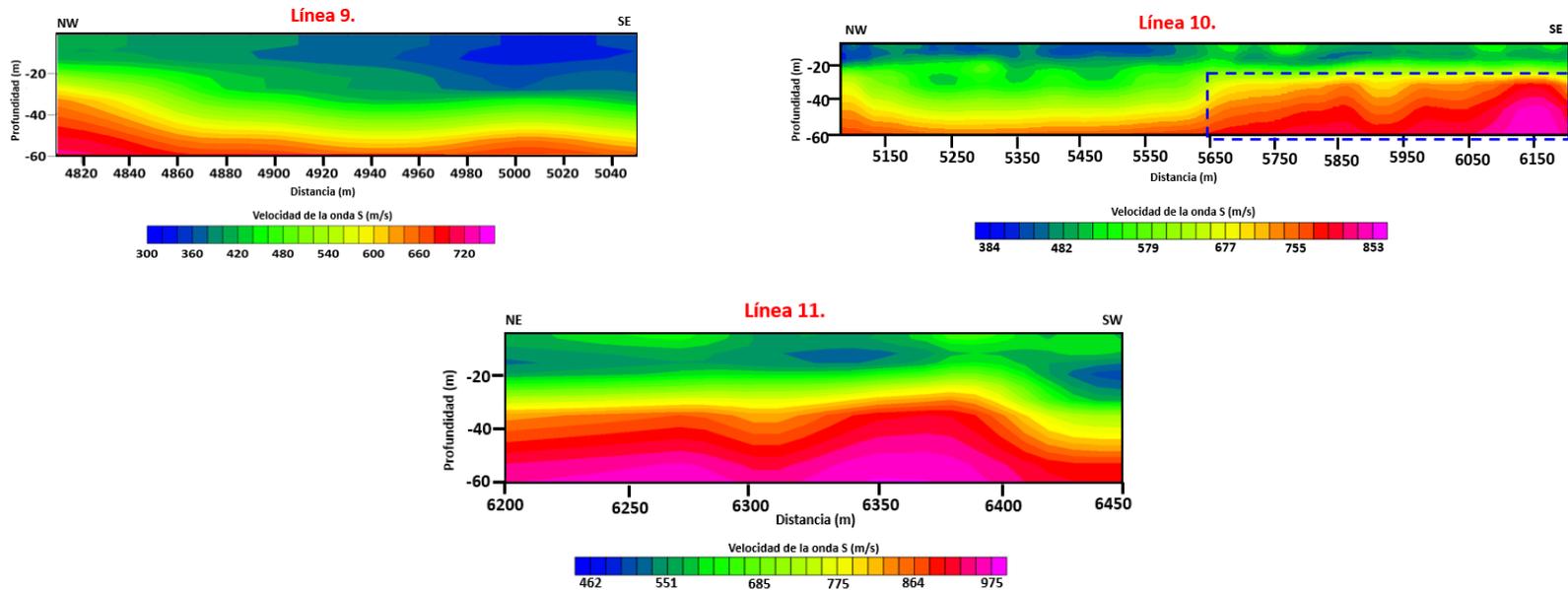
- Primera zona, de velocidades bajas (340 - 550 m/s aprox.) de color azul y verde claro, en profundidades menores a los 20 a 40 m.
- Segunda zona, de velocidades intermedias (500 - 850 m/s aprox.) de colores verde fosforescente a rojo y fucsia (para algunos modelos).
- Tercera zona, de velocidades altas  $>850$  m/s de colores rojo a fucsia que puede estar relacionada con: la continuación de una capa estratigráfica menos alterada, un cuerpo intrusivo, fallas someras o con problemas en la adquisición de los datos en campo.

A pesar de que se intentó dividir el perfil 1 de MASW en segmentos rectos para evitar los cambios de dirección del tendido de geófonos; existen zonas en las que se tomaron en cuenta, para poder hacer una interpretación de los datos adquiridos; estas zonas se ven claramente reflejadas en un aumento del valor de la  $V_s >1000$  m/s en algunos perfiles, debido a que los apilamientos no son simétricos. Las zonas encerradas en rectángulos segmentados de color azul en la figura 46, marcan las anomalías de  $V_s >850$  m/s, que no están relacionados con la forma de adquisición de los datos sísmicos en CGLTV, sino con las propiedades físicas de las estructuras del subsuelo.

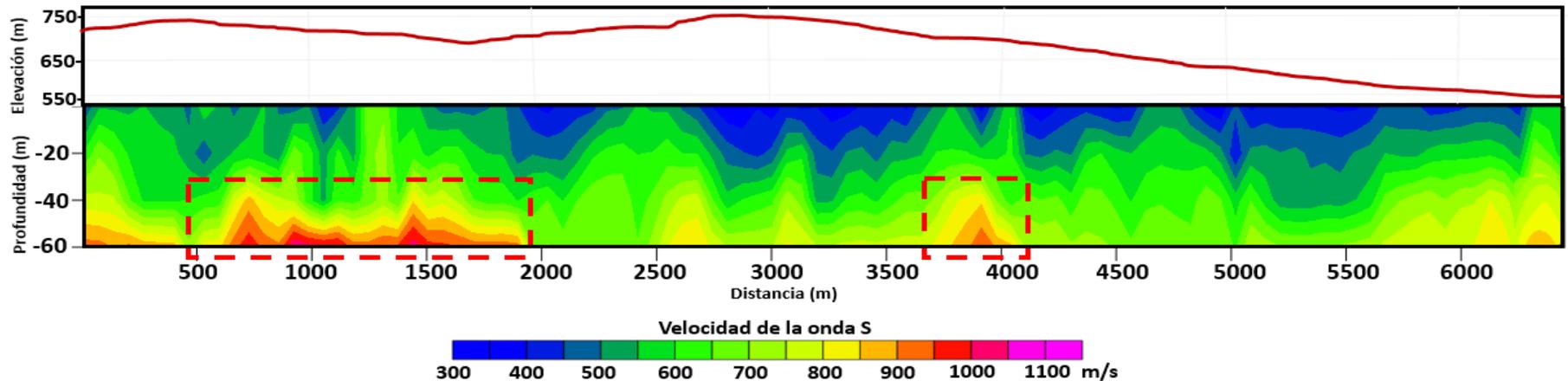
Según López et al. (1993), las fallas inferidas Las Víboras y El Colapso, atraviesan la línea 1 y 3, entre los 280 m y 290 m (Figura 44 Derecha), sin embargo, con el método MASW se comprueba que estas fallas no tienen evidencia superficial ni en los primeros 60 m de profundidad, por lo que se presume que estas fallas fueron sepultadas por los depósitos volcánicos más recientes.



**Figura 46.** Modelos de la velocidad superficial 2D, de las 11 líneas en las que se divide en perfil 1 de MASW, la escala de colores es relativa con respecto a cada uno de los modelos. Los recuadros azules representan las anomalías de alta velocidad en el subsuelo, relacionados con los cambios de las propiedades físicas del subsuelo.



**Figura 47 (Continuación).** Modelos de la velocidad superficial 2D, de las 11 líneas en las que se divide en perfil 1 de MASW, la escala de colores es relativa con respecto a cada uno de los modelos. Los recuadros azules representan las anomalías de alta velocidad en el subsuelo, relacionados con los cambios de las propiedades físicas del subsuelo.



**Figura 47. Superior.** Elevación topográfica del perfil 1. **Inferior.** Modelo 2D completo de la velocidad de la onda S del perfil 1 de MASW. Los recuadros en rojo representan las anomalías de alta velocidad relacionadas con los cambios de las propiedades físicas del subsuelo.

### 3.1.1.3. Modelo 2D completo de $V_s$ , a lo largo del perfil 1

Para identificar las características más importantes de manera generalizada de la distribución de la velocidad de la onda S del perfil 1 de MASW, se construye un modelo 2D (Figura 47), a partir de la integración e interpolación del valor de la velocidad de la onda S obtenida de cada uno de los once modelos 2D, descritos anteriormente, evitando totalmente los efectos de los cambios en la orientación del tendido de los geófonos.

El modelo 2D completo de la distribución de la  $V_s$  tiene una longitud de 6500 m, maneja un rango de velocidades de la onda S, que aumenta con la profundidad y varía entre 342 m/s y 1237 m/s y alcanza una profundidad máxima de 60 m; se distinguen 3 rangos diferentes de la distribución de la  $V_s$ , que también se relacionan con los modelos 1D:

- Primer rango, velocidades bajas (340 - 550 m/s aprox.) de colores azul y verde claro, que se encuentran solo en la parte superior del perfil y alcanzan una profundidad máxima de 30 m.
- Segundo rango, velocidades intermedias (550 - 850 m/s aprox.) de color verde fosforescente, que se distribuyen a lo largo del modelo y en algunas zonas alcanzan 60 m de profundidad.
- Tercer rango, velocidades altas (800-1240 m/s aprox.) de colores que varían desde amarillo tenue a fucsia, que representan la distribución de  $V_s$  a grandes profundidades y la distribución de las anomalías de los valores de  $V_s$  altas a lo a largo del perfil completo.

En el modelo completo 2D (Figura 47), se pueden observar varias anomalías en el subsuelo con  $V_s > 800$  m/s, las principales se observan entre los 500 y 2000 m de distancia, cerca de la zona en la que se encuentra el pozo LV-2 y una anomalía de  $V_s > 900$  m/s a los 3700 m de la longitud del tendido.

Comparando la geología superficial reportada por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013), descrita en la Figura 44. Derecha, y los cambios de la velocidad de las ondas superficiales (Figura 47), se observa que el área de flujo de escombros (Dfe) y Avalancha de Escombros de Aguajito (DAE-V) tiene una  $V_s > 400$  m/s, la Ignimbrita Riolitica Aguajito (IRA) tiene velocidades entre 360 m/s y los 384 m/s, mientras que los Depósitos de Lava Dacíticos La Puerta (DLDP), están representados por una capa homogénea  $V_s > 360$  m/s.

## **3.2. Método gravimétrico**

En esta sección se presentan los resultados e interpretación geológica de los datos gravimétricos adquiridos en 223 estaciones gravimétricas de una parte del CVLTV (Figura 37). Con el objetivo de determinar los principales rasgos estructurales, se construyeron modelos verticales del subsuelo a partir de la geología superficial, datos de columnas litológicas de los pozos perforados en el CGLTV y el valor promedio de la densidad de las capas estructurales.

### **3.2.1. Mapas de anomalías gravimétricas**

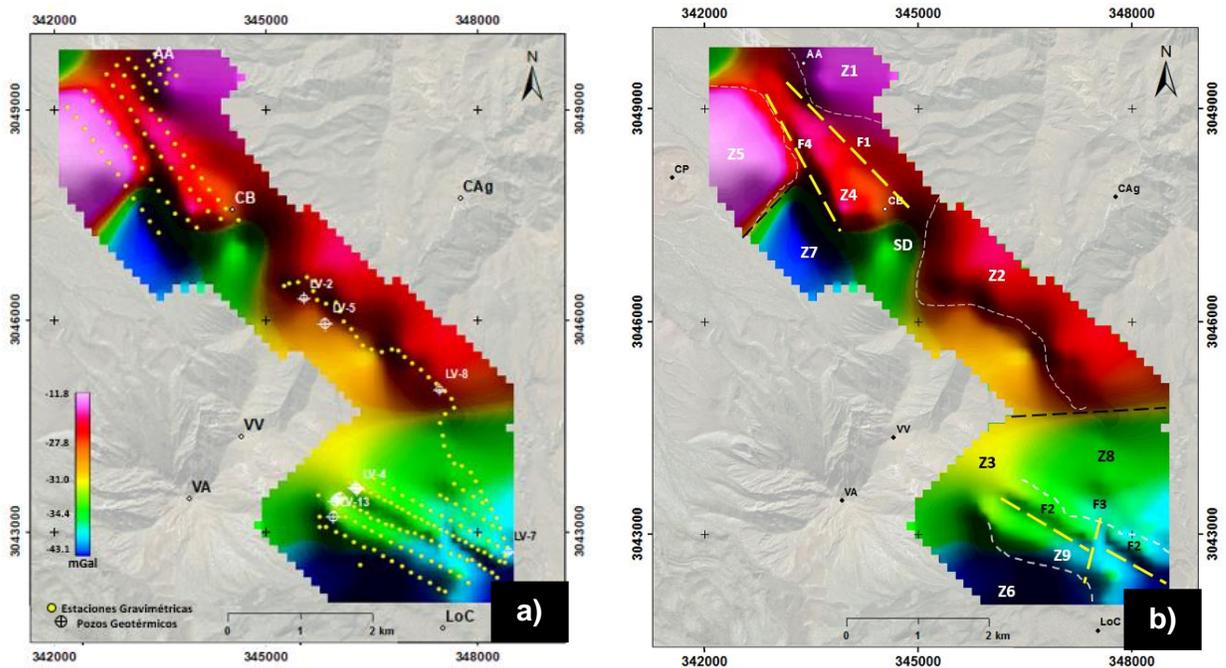
A partir de la gravedad observada y del modelo digital de elevación (DEM) local de la zona de estudio, se calculan las principales anomalías gravimétricas y se interpolan los datos obtenidos mediante el método de mínima curvatura (dado que permite tener un mejor ajuste a los valores medidos). Para crear los mapas de las anomalías gravimétricas, se toma como referencia el sistema elipsoidal WGS-84 y el valor promedio de la densidad del terreno como  $2.67 \text{ g/cm}^3$ . En los mapas (Figura 48 a 52), los colores fucsia y rojo corresponden a los valores de la anomalía gravimétrica más alta (positiva), las tonalidades naranjas a verde indican intermedios y los colores azules representan los bajos gravimétricos. Es importante considerar que para que los mapas tuvieran perspectiva tipo 3D se generan unas sombras de color negro, que no guardan relación con las anomalías gravimétricas calculadas. Además, cada mapa tiene su propia escala de valores.

#### **3.2.1.1. Mapa de anomalía de Bouguer completa (ABC)**

La anomalía de Bouguer completa permite eliminar los efectos externos a la fuente que genera la anomalía gravimétrica, por lo tanto, permite determinar la distribución lateral de la densidad, la geometría de las fallas principales y ubicación de las estructuras geológicas. La anomalía varía en un rango entre  $-11.8$  y  $-43.1 \text{ mGal}$ . La ABC es negativa en la zona del CVLTV, debido a que las montañas tienen raíces de menor densidad que el material que las rodea, por lo tanto, habrá un efecto negativo de atracción que disminuye la gravedad observada. En la Figura 48, se identifican 9 zonas de gradientes de ABC diferentes, relacionadas con estructuras geológicas y un sistema de fallas interpretadas, representadas como líneas rectas

segmentadas de color amarillo, las cuales indican la posible localización de la falla, mas no la trayectoria del buzamiento.

- Z1. Zona de anomalías gravimétricas altas (color fucsia), entre -11.8 y -25.2 mGal, ubicada en la parte norte de la caldera El Aguajito, donde se encuentra la manifestación hidrotermal Agua Agria, esta anomalía continúa hacia Z2, donde se encuentra la zona de transición entre el volcán El Viejo y la caldera El Aguajito de alrededor de -27 mGal. Z3. Zona de anomalías gravimétricas (color naranja a amarillo) entre -11.8 y -31 mGal, aproximadamente, dirigida hacia el centro de los volcanes del CVLTV.
- Z4 y Z5. Zonas de anomalías gravimétricas altas, de aproximadamente -27.8 mGal, al oeste de Cerro Blanco en dirección NW-SE, la cual no tiene evidencia superficial y Z5 con anomalías entre -11.8 y -24 mGal al este de la estructura volcánica extrusiva basáltica, Cerrito Prieto.
- Z6 y Z7. Zona de anomalías gravimétricos bajas, entre -39.5 y -43.1 mGal, en los flancos del volcán y Z8, de anomalía intermedia aproximadas a -34.4 mGal, de color verde, que limitan con Z2.
- Z9. Zona de anomalías gravimétricas de valores intermedios a bajos, parece ser una estructura, que se encuentra segmentada por la falla F2 de dirección NW-SE y posteriormente por la falla F3, que corta de manera casi perpendicular la estructura. La parte norte de Z9 es la zona en la que se distribuyen los pozos productores del CGLTV actualmente.



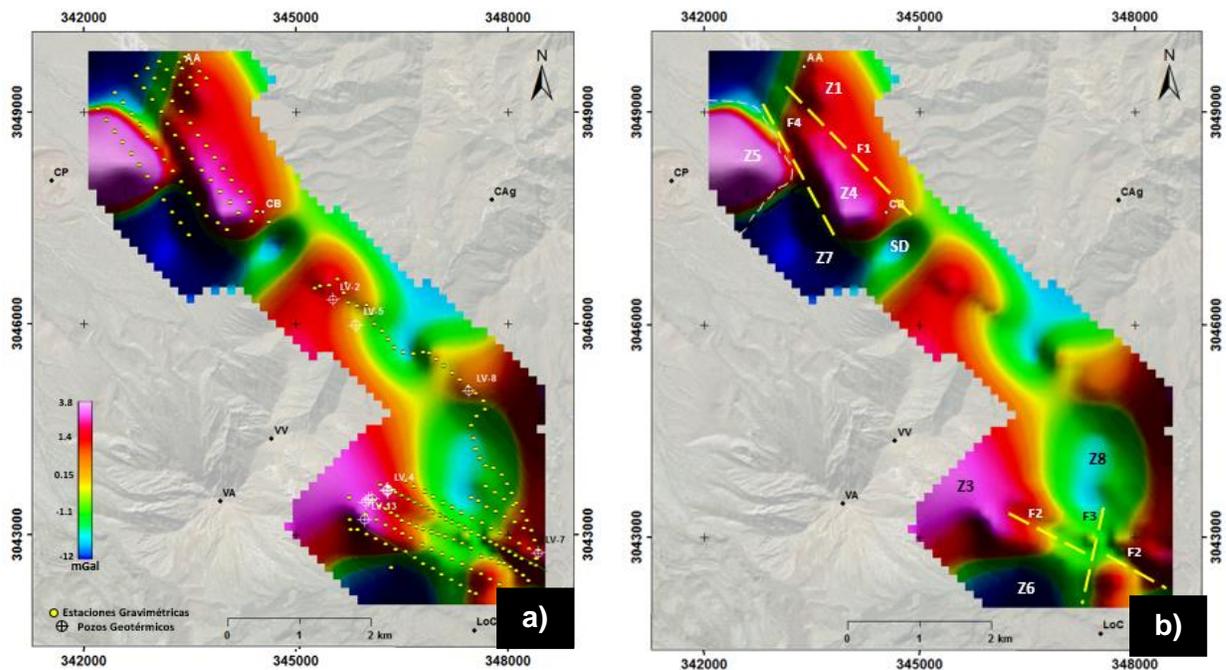
**Figura 48. a)** Mapa de anomalía de Bouguer completa (ABC), ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). **b)** Interpretación del mapa ABC, Z1 a Z9, representan estructuras geológicas, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F1 a F4), las líneas negras segmentadas indican cambios abruptos de la anomalía. Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.

La falla F1 tiene una dirección NW-SE y se extiende desde la parte norte del CVLTV hasta el volcán El Viejo. F1, separa la caldera El Aguajito y la estructura Z4. La falla F4, de dirección NW-SE de alto ángulo, separa la estructura Z4 y Z5 y parte de la estructura Z7. Las líneas negras segmentadas, marcan los cambios abruptos de la ABC. La zona indicada como SD, de baja anomalía, es producto de la interpolación automática que realiza el programa en las zonas en la que no hay mediciones gravimétricas, pero se presume que al formar parte regionalmente de la caldera El Aguajito, de una alta anomalía.

### 3.2.1.2. Mapa de anomalía residual

A partir del mapa de anomalía de Bouguer se separa la tendencia regional de la residual, con el fin de evaluar las anomalías de corta longitud de onda, producidas por cuerpos de roca superficiales o de la extensión local de la corteza superior. La anomalía residual se realizó usando el método de ajuste

polinomial de tercer orden, la anomalía varía entre  $-12$  y  $8.3$  mGal (Figura 49). Mantiene altos gravimétricos en las zonas de los volcanes Z3, Z4 y Cerrito Prieto Z1, relacionado geológicamente con las rocas más densas. Z8 representan un bajo gravimétrico en forma de cuenca al SE del mapa, cerca del pozo LV-8, en la zona intermedia entre los depósitos de flujo de escombros ignimbríticos del Aguajito y los depósitos de los volcanes El Azufre y El Viejo. Z7, representa el área más baja de la anomalía residual, al igual que en el mapa de ABC. Similar a los mapas de las anomalías gravimétricas anteriores se interpreta un sistema de fallas que afectan a las estructuras en este caso más superficiales del complejo.

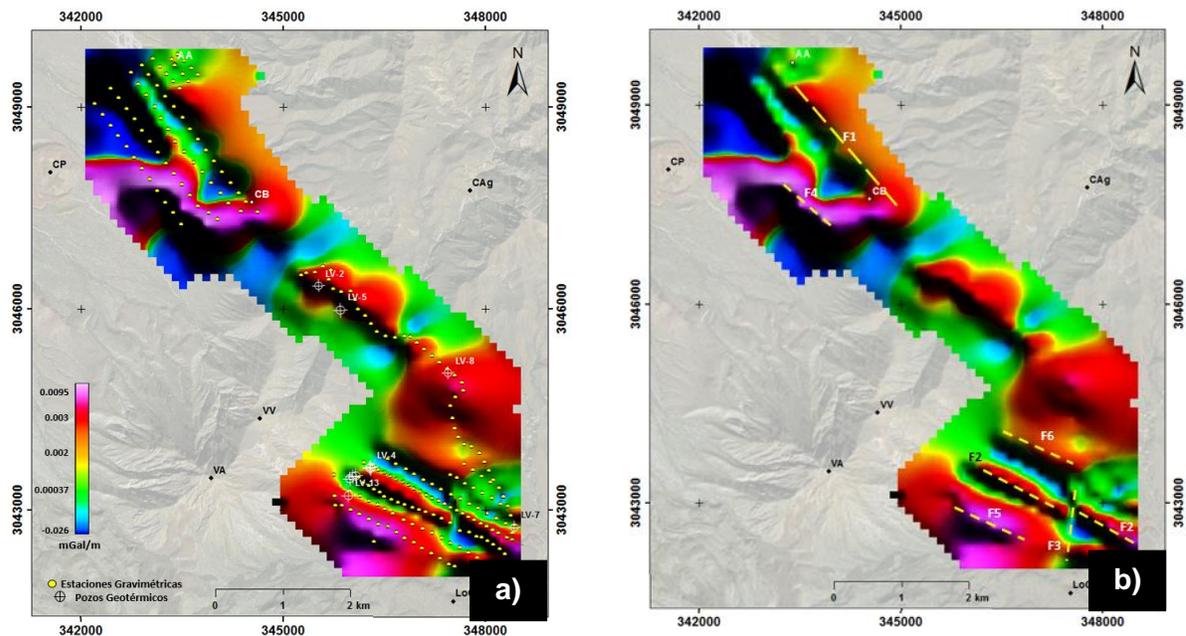


**Figura 49. a)** Mapa de anomalía residual, ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). **b)** Interpretación del mapa de anomalía residual, Z1 a Z9, representan estructuras geológicas, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F2 a F4). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cueva.

### 3.2.1.3. Mapa de gradiente horizontal

Los valores máximos en el mapa de gradiente horizontal se relacionan con el borde del cuerpo de la montaña o rocas intrusivas y estructuras de falla principalmente. La anomalía varía entre  $-0.026$  y  $0.021$  mGal/m (Figura 50), los máximos gravimétricos muestran la posición y dirección de las fallas F1, F2 y F4,

la dirección NE-SW de falla transformante F3 y se marcan las fallas F5 y probable falla F6 que confirman un sistema de fallas más complejo dentro del CGLTV, en dirección NE-SW, relacionado con la activación tectónica del CVLTV, después de la apertura del Golfo de California. El área en el que se encuentran los pozos productores del campo geotérmico está bien correlacionada con las anomalías de gradiente horizontal que se interpretan como límites o fallas. Esto confirma que los fluidos geotérmicos están estructuralmente controlados por el sistema de fallas del CVLTV, además, la manifestación hidrotermal Agua Agria está ubicada cerca de la falla F1.

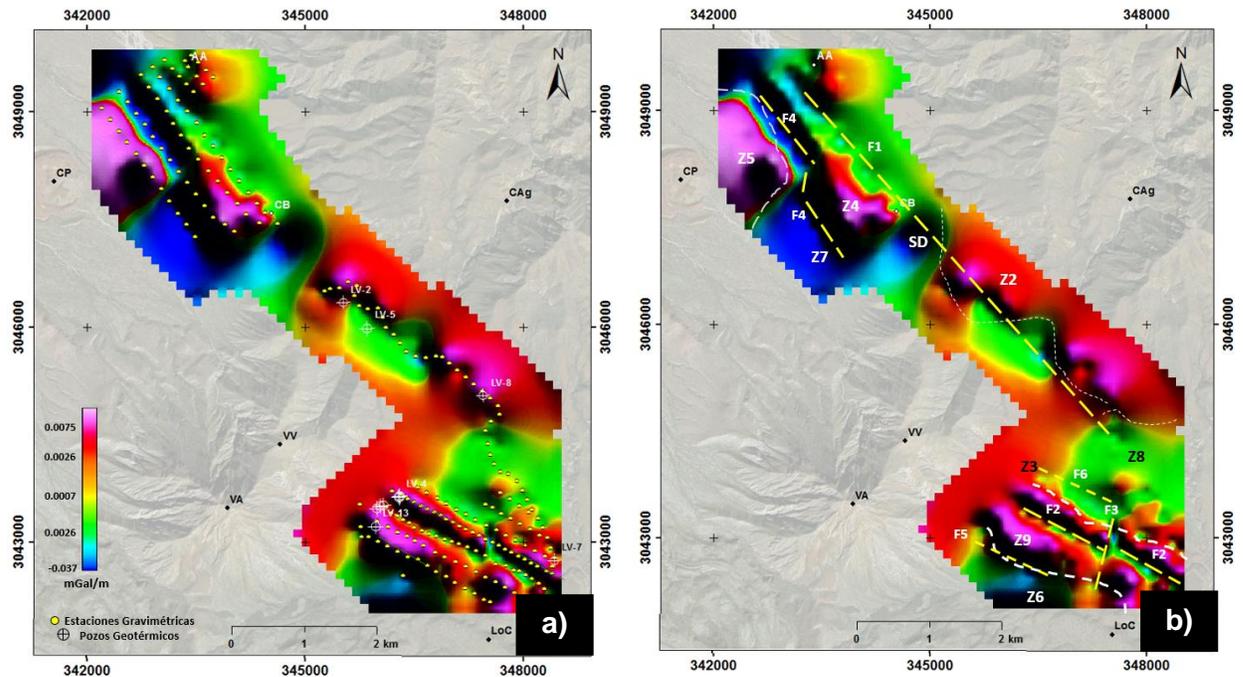


**Figura 50. a)** Mapa de gradiente horizontal, ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). **b)** Interpretación del mapa de gradiente horizontal, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F1 a F6). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.

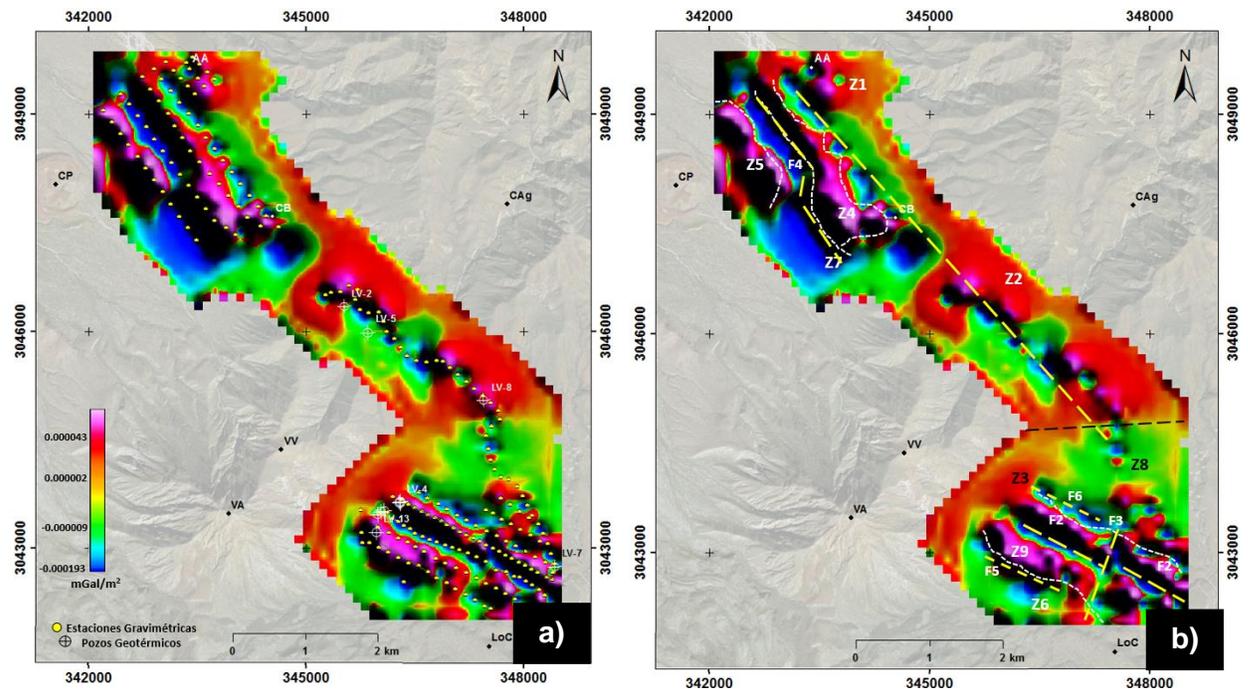
### 3.2.1.4. Mapa de la primera y segunda derivada vertical

Los mapas de las derivadas verticales de la ABC calculan la distribución de la anomalía a diferentes profundidades mediante filtros, la primera derivada permite identificar contactos entre los cuerpos superficiales con alto contraste de densidad y donde la segunda derivada vale cero corresponde con los bordes de dicho cuerpo. Las anomalías varían entre -0.037 y 0.0075 mGal/m para la primera derivada y -0.000193 a 0.000043 mGal/m<sup>2</sup> para la segunda derivada (Figura 51 y 52). Tanto en el mapa de primera y

segunda derivada, se ve el borde de los cuerpos Z4, Z5, Z6, Z7, Z8 y parte del borde de las zonas Z2 y Z3 descritos anteriormente. En los mapas de las derivadas verticales se define con mayor detalle los bordes de la estructura Z9 y se determina que corresponde a una sola estructura que ha sido afectada por el sistema de fallas interpretadas F2, F3, F5 y F6.



**Figura 51. a)** Mapa de la primera derivada vertical, ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). **b)** Interpretación del mapa de la primera derivada vertical, Z2 a Z9, representan estructuras geológicas, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F1 a F6). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifiestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.



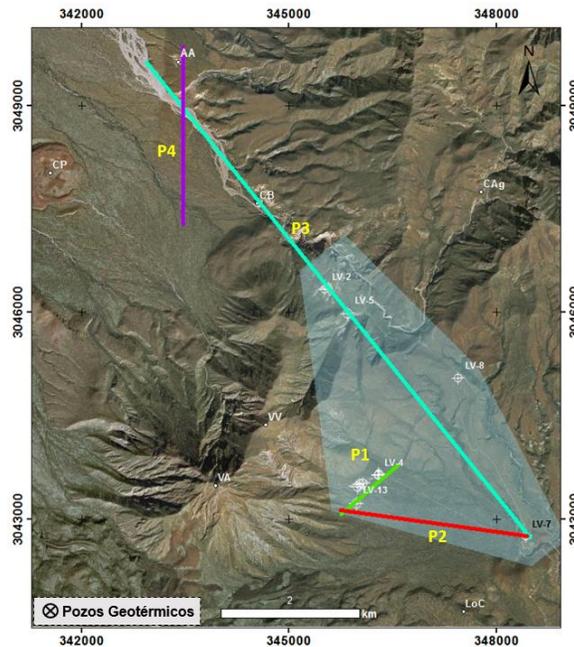
**Figura 52. a)** Mapa de la segunda derivada vertical, ubicación de las estaciones gravimétricas (puntos amarillos) y de los pozos geotérmicos (círculos blancos). **b)** Interpretación del mapa de la segunda derivada vertical, Z1 a Z9, representan estructuras geológicas, las líneas amarillas segmentadas indican las fallas interpretadas (F1 a F6). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agría. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.

### 3.2.2. Modelos verticales bidimensionales

Se realizaron 4 modelos verticales gravimétricos bidimensionales del subsuelo (Figura 53), ubicados dentro y fuera del CGLVT, con el fin de definir la distribución de los principales grupos y formaciones geológicas en profundidad y de representar las fallas interpretadas que caracterizan parte del CVLTV.

Los modelos verticales bidimensionales (modelo inverso) se construyen a partir un modelo inicial, en el que a medida que la gravedad calculada se ajusta a la gravedad observada, se va mejorando la calidad del modelo. La gravedad observada representa los valores de la anomalía de Bouguer completa y la gravedad calculada depende de la información de las estructuras geológicas y sus propiedades físicas; los espesores de las secuencias estratigráfica del CVLTV se establecen con base en la información de las columnas litológicas de los pozos del CGLTV y se toma en cuenta la geología superficial, descrita por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Es importante aclarar que no existe un modelo único, por el principio de la no

unicidad, sin embargo, su validez depende de la correlación de la información geológica y geofísica disponible de la zona de estudio.



**Figura 53.** Ubicación de los modelos verticales bidimensionales. P1-Modelo 1. P2-Modelo 2. P3-Modelo 3. P4-Modelo 4. El polígono azul indica la geometría del campo geotérmico Las Tres Vírgenes, CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.

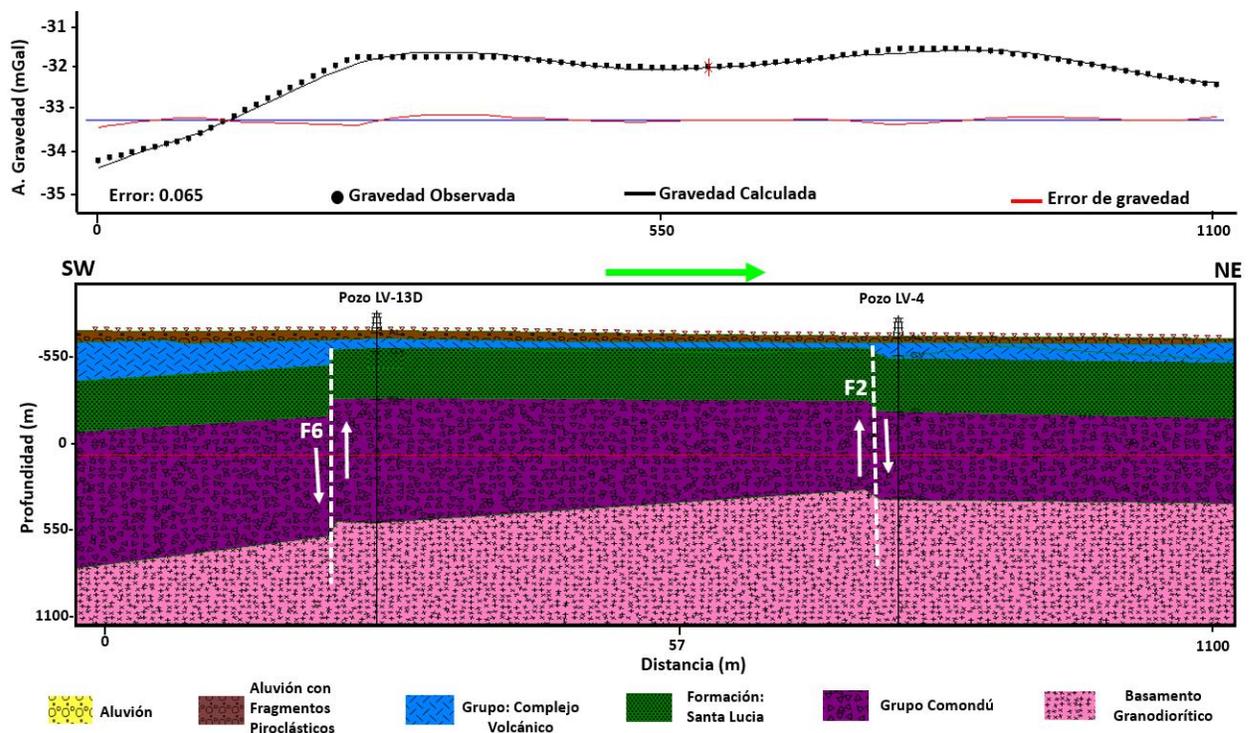
Las principales propiedades físicas utilizadas para crear los modelos, son la densidad de las estructuras del subsuelo, la velocidad de las ondas sísmicas y la susceptibilidad magnética. En este caso solo se cuenta con información de la densidad de las rocas que forman parte del CVLTV, la cual se resumen en la Tabla 3, esta información se recolectó de muestras de núcleos de rocas de los pozos perforados por la CFE, de rocas tomadas superficialmente y de la literatura (Telford et al., 1991).

**Tabla 3.** Valores de densidad de las rocas que conforman el CVLTV. Modificado de Telford et al. (1991).

UNIDAD LITOLOGICA	RANGO DE DENSIDADES (g/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD PROPUESTA (g/cm <sup>3</sup> )
Aluvión	1.2-2.4	1.03
Flujo de escombros	1-2	1.3
Grupo: Complejo Volcánico de las TV	2-3	2.1
Formación: Santa Lucía	2.4-2.8	2.6
Grupo: Comondú	1.6-3.03	2.3
Basamento Granodiorítico	2.67-2.79	2.74

### 3.2.2.1. Modelo 1-P1

Tiene una extensión de 1100 m (Figura 54) en dirección SW-NE, está ubicado dentro del CGLTV, en la zona de los pozos productores, atravesando los pozos productores LV-13D y LV-4, en el límite superficial del volcán El Viejo. Los espesores de las capas aumentan hacia el SW, el basamento en la parte SW, se encuentra alrededor de 200 m, más profundo, que en la zona cercana al pozo LV-4, lo cual coincide con la disminución de la anomalía de la gravedad observada. Las fallas F6 y F2, se localizan cerca de los pozos LV-13D y LV-4, según la información geológica no existe evidencia del afloramiento de estas fallas, sin embargo, se considera que están estrechamente relacionadas con el potencial geotérmico del CGLTV.

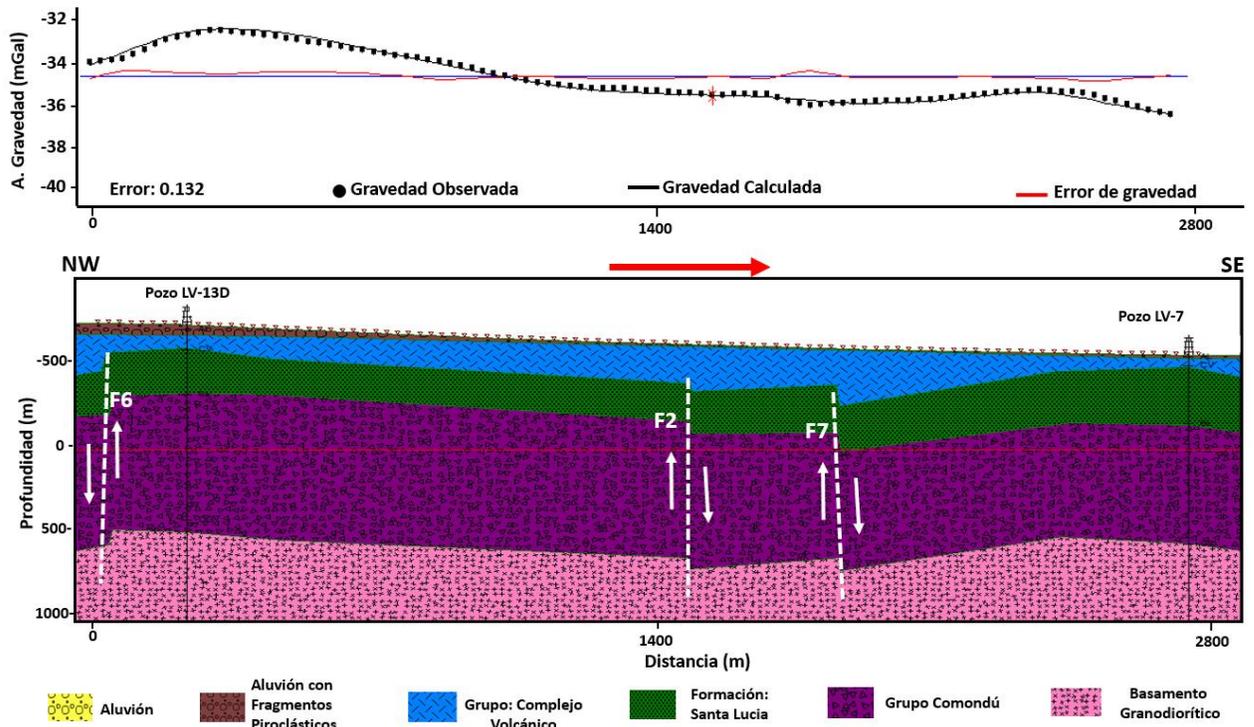


**Figura 54. Superior.** Comparación entre la anomalía gravimétrica observada (puntos negros) y la calculada (línea negra) y el grado de error del ajuste. **Inferior.** Modelo bidimensional 1 en dirección SW-NE, ubicado dentro del CGLTV y es controlado con la información de las columnas litológicas de los pozos LV-13D y LV-4 de la CFE (Generación VI) y la geología superficial propuesta por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Se observa la distribución de las principales estructuras geológicas. F2 y F6 son fallas interpretadas.

### 3.2.2.2. Modelo 2-P2

Tiene una extensión aproximada de 2800 m (Figura 55) en dirección NW-SE, está ubicado entre los pozos LV-13D y LV-7 del CGLTV. Los espesores de las unidades litológicas se mantienen constantes a lo largo del

modelo, sin embargo, en la parte central se genera un hundimiento de las estructuras del CGLTV, donde pasa el sistema de fallas F2 y F7. Este hundimiento representa la forma de una falla de crecimiento (roll-over), que indica un desplazamiento vertical-horizontal. Este sector está atravesando perpendicularmente la falla F3 que corta la estructura profunda Z9. La falla F6 afecta el sistema estructural en la parte NW del modelo. Este sistema de fallas no tiene evidencia superficial.



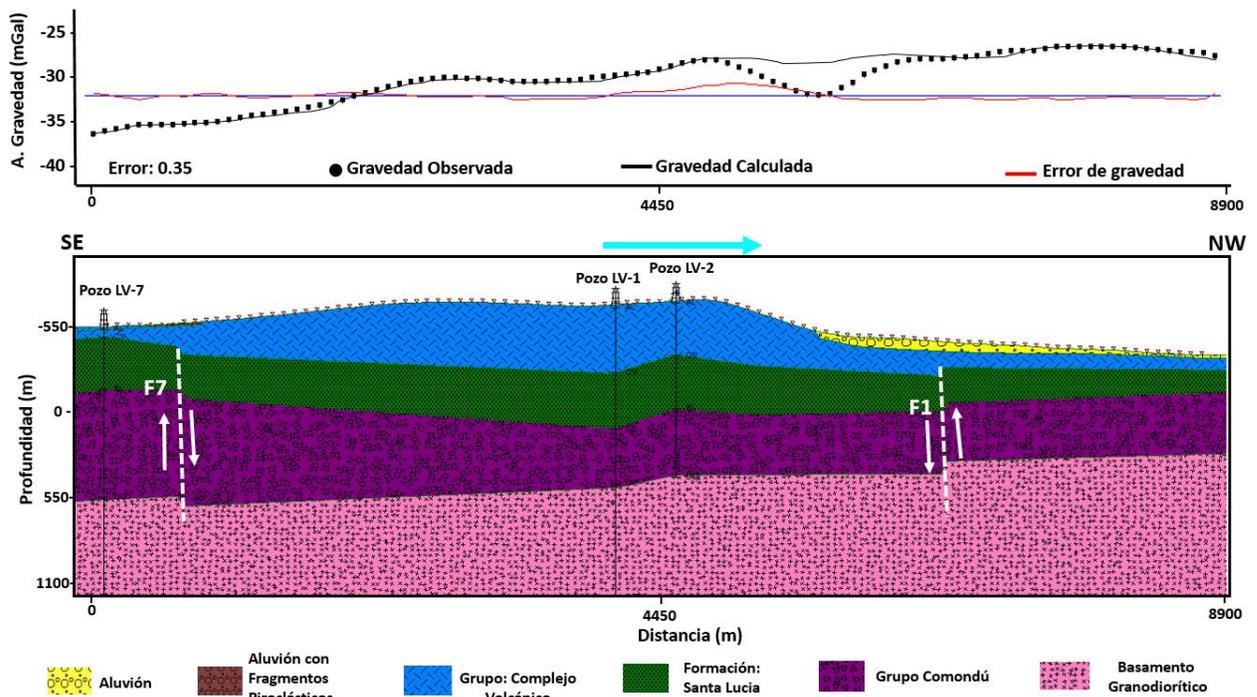
**Figura 55. Superior.** Comparación entre la anomalía gravimétrica observada (puntos negros) y la calculada (línea negra) y el grado de error del ajuste. **Inferior.** Modelo bidimensional 2, en dirección NW-SE, ubicado dentro del CGLTV y es controlado con la información de las columnas litológicas de los pozos LV-13D y LV-7 de la CFE (Generación VI) y la geología superficial propuesta por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Se observa la distribución de las principales estructuras geológicas. F2, F6 y F7 son fallas interpretadas.

### 3.2.2.3. Modelo 3-P3

Tiene una extensión aproximada de 8900 m (Figura 56) en dirección SE-NW, está ubicado entre el pozo LV-7, al sur del CGLTV y la manifestación hidrotermal Agua Agria, al NW de la caldera El Aguajito.

El modelo está controlado por la información estratigráfica de 3 pozos perforando en el CGLTV. La presencia de un bajo gravimétrico cerca de los 6000 m, se debe a que no se tomaron en cuenta las estaciones gravimétricas en esta zona, por lo que, para hacer una mejor representación de las estructuras

del subsuelo y un mejor ajuste de las anomalías, se trabajó la zona en dos secciones separadas, conservando las tendencias de las capas estructurales. El espesor de las estructuras disminuye en dirección NW y el basamento se hace más somero hacia el norte del CVLTV, se nota un engrosamiento del grupo Complejo Volcánico, en la parte central del modelo, en donde se encuentra las elevaciones más altas debido a los depósitos volcánicos de El Viejo y flujos de lava. Las estructuras son cortadas por las fallas F7 y F1. Las capas estratigráficas en el pozo LV-2, son un poco más someras que en el pozo LV-1, por lo que se puede inferir que hay un sistema de fallas que está afectado esta área, sin embargo, no han sido detectada en este proyecto.

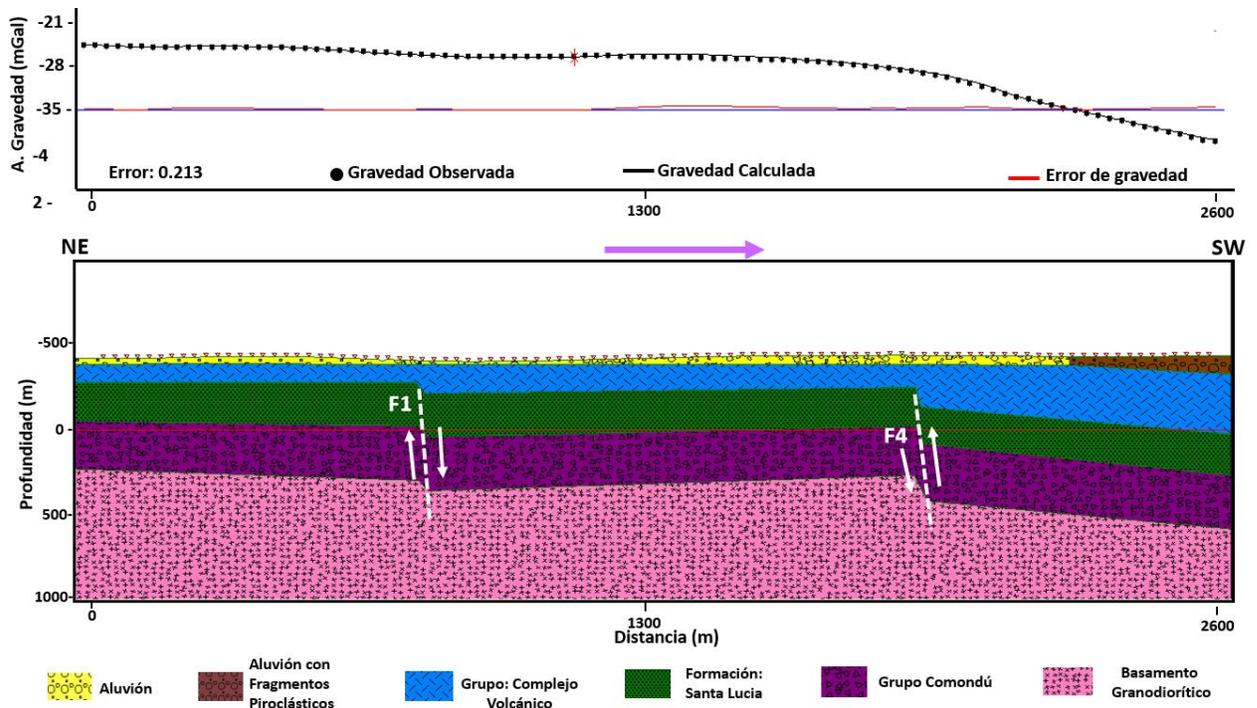


**Figura 56. Superior.** Comparación entre la anomalía gravimétrica observada (puntos negros) y la calculada (línea negra) y el grado de error del ajuste. **Inferior.** Modelo bidimensional 3, en dirección SE-NW, ubicado dentro y fuera del CGLTV y es controlado con la información de las columnas litológicas de los pozos LV-7, LV-1 y LV-2 de la CFE (Generación VI) y la geología superficial propuesta por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Se observa la distribución de las principales estructuras geológicas. F1 y F7 son fallas interpretadas.

#### 3.2.2.4. Modelo 4-P4

Tiene una extensión aproximada de 2600 m (Figura 57) en dirección NE-SW, está ubicado fuera del CGLTV, cerca de la manifestación hidrotermal Agua Agría.

En este caso no se cuenta con información de núcleos de pozos perforados, pero se construye el modelo tomando como referencia el espesor promedio de las capas del CVLTV registradas en otros sectores, en especial del modelo 3 y la forma de la anomalía de Bouguer completa, que indica que el basamento granodiorítico se va haciendo más profundo hacia el SW, en la zona de los flancos de los volcanes. El modelo se ve afectado por dos fallas F1 y F4 en dirección NW-SE. La capa superficial varía entre aluvión, producido por el cañón El Azufre y la capa de flujo de escombros proveniente de los aparatos volcánicos.



**Figura 57. Superior.** Comparación entre la anomalía gravimétrica observada (puntos negros) y la calculada (línea negra) y el grado de error del ajuste. **Inferior.** Modelo bidimensional 4, en dirección NE-SW, ubicado fuera del CGLTV y es controlado por la geología superficial propuesta por Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado (2013). Se observa la distribución de las principales estructuras geológicas. F1 y F4 son fallas interpretadas.

## Capítulo 4. Discusiones

---

### 4.1. Métodos sísmicos

#### 4.1.1. Relación de sísmica de reflexión y el modelo magnetotelúrico propuesto por Antayhua-Vera (2017)

Antayhua-Vera (2017) realizó una caracterización magnetotelúrica (MT) del CVLTV (Figura 16), a partir de la cual estableció que el CGLTV está formado por cinco zonas a profundidad: 2 dos resistivas (R1 y R2) y tres conductoras (C1, ¿C2? y ¿C3?), las que se encuentran plenamente identificadas son R1, R2 y C1.

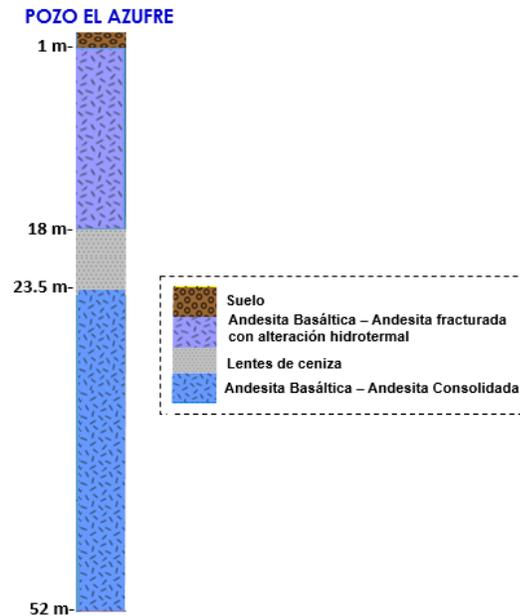
La primera zona superficial de resistividad R1 (30-80Ωm), la asocia a las rocas volcánicas La Virgen, El Azufre y El Viejo a profundidades menores de 500 m, que representa al Grupo Complejo Volcánico y se correlaciona con la estructura C1, de amplitudes altas, establecida en nuestros resultados de sísmica de reflexión. (Antayhua-Vera, 2017)

La segunda zona conductiva C1 ( $\leq 10\Omega m$ ), se encuentra por debajo R1 y alcanza 1 km de profundidad aproximadamente. Esta anomalía se presenta en la mayoría de los CGLTV y volcánicos del mundo, en el CVLTV es representada por las rocas de la Formación Santa Lucía y el Grupo Comondú. Esta capa conductora, se correlaciona con la estructura C2 vista en sísmica de reflexión de bajas amplitudes y bajas velocidades de las ondas sísmicas. Esta zona presenta un alto grado de fracturamiento que permite que haya una mayor interacción del mecanismo fluido-roca, generando mayor alteración hidrotermal en el sistema estructural y por lo tanto que se registra como una capa conductora. En esta zona se alcanzan temperaturas que fluctúan entre los (70-200°C), lo que sustenta el hecho de que se formen ventilas hidrotermales a través de las cuales ascienden los fluidos por medio de las fracturas, los cuales afectan las propiedades sísmicas y geoelectricas del subsuelo (Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2012, 2013).

#### 4.1.2. Correlación del pozo El azufre y el pozo LV-2 con la estructura somera del campo geotérmico Las Tres Vírgenes

Como parte de los objetivos de la campaña de adquisición de datos geofísicos del proyecto número 2016-01-2188 del CONACYT, se perforo el pozo exploratorio *El Azufre* de 52 m de profundidad, ubicado a unos 160 m al este del pozo LV-2 del CGLTV y aproximadamente a unos 10 m de la línea 2 de MASW (Figura

44), el grupo CeMIEGeo (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica) realizó la descripción petrográfica de los núcleos de pozo y determinó que la columna litológica está conformada por: 1 m de suelo, una capa de 17 m de andesita basáltica con fracturamiento hidráulico y coloración rojiza por alteración hidrotermal, 5.5 m de pequeños lentes de ceniza volcánica, que densificaron el fluido de perforación y 28.5 m de andesita basáltica y andesita, con poco fracturamiento y alteración hidrotermal. La columna litológica completa se muestra en la Figura 58.



**Figura 58.** Columna litológica del pozo El Azufre, perforado dentro del CVLTV, durante la campaña de adquisición de datos geofísicos del proyecto número 2016-01-2188 del CONACYT.

La CFE realizó la descripción litológica del pozo LV-2 del CGLTV en el que reporta que los primeros 15 m corresponden a una capa aluvión, constituido principalmente por fragmentos piroclásticos, representados por tobas vítreas con piroclastos andesíticos basálticos y fragmentos minerales de plagioclasas y ferromagnesianos alterados. Entre los 15 m a los 195 m se reporta roca andesita vítrea, con variaciones a andesitas basálticas con hornoblenda basáltica como accesorio, que corresponde a la formación andesita El Azufre de la parte superior del grupo Complejo Volcánico. Posteriormente se encuentran la Formación Santa Lucía, el Grupo Comondú y el basamento granodiorítico a profundidades de 356 m, 695 m y 1126 m, respectivamente (Figura 4) (Portugal et al., 2000). (Portugal et al., 2000)

Con base en las descripciones de las columnas litológicas de estos dos pozos se podrían sugerir, que tanto la litología del pozo El Azufre en los primeros 18 m y del pozo LV-2 a los 15 m de profundidad, hacen referencia al mismo paquete de capa alterada y no tan consolidada de aluvión con fragmentos piroclásticos de andesitas. Posteriormente el pozo El Azufre atraviesa un grupo de lentes de ceniza volcánica, el cual probablemente no es detectado en el pozo LV-2, por las dimensiones del mismo e inmediatamente después, los dos pozos reportan una capa de andesita con variaciones de andesita basáltica consolidada que pueden estar relacionados con la formación andesita El Azufre.

En la Tabla 4 se muestra la clasificación de la velocidad de la onda S en los primeros 30 m de profundidad,  $V_{s30}$ , para diferentes tipos de materiales rocosos, reportado por el International Building Code (IBC, 2012), mientras que la Tabla 5, muestra los valores de la velocidad de la onda S calculados en el laboratorio, para algunos materiales volcánicos y rocas duras secas, sin ningún tipo de alteración (Building Seismic Safety Council, 2003; Mendoza, 2015).

**Tabla 4.** Clasificación de la velocidad de la onda S para diferentes tipos de material en los primeros 30 m de profundidad (IBC, 2012).

Tipo de material	$V_{s30}$ (m/s)
Roca dura	>1500
Roca	760-1500
Roca blanda y suelo muy denso	360-760
Suelo rígido	180-360
Suelos blandos – Aluvión	<180

**Tabla 5.** Velocidad de la onda S para diferentes tipos de material en laboratorio (Mendoza, 2015).

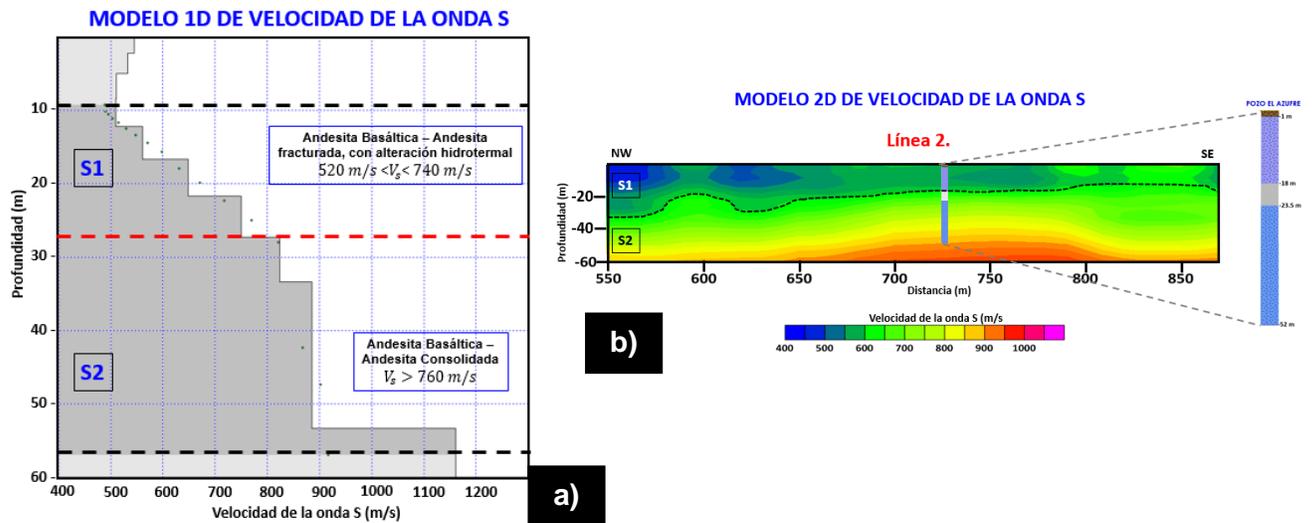
Tipo de material	$V_s$ (m/s)
Aluvión	150 – 175
Ceniza Volcánica	180 – 202
Depositos Piroclásticos	590 – 800
Lutitas y arcillas	200 - 800
Basalto sano	2800 – 3400

Correlacionando la información litológica del pozo El Azufre y LV-2 con el modelo 1D y 2D de  $V_s$  de la línea 2 (Figura 59). Se puede determinar dos secuencias estratigráficas diferentes:

- Secuencia S1: A profundidades entre los 10 m y los 22 a 27 m, con  $V_s$  que varía entre los 520 m/s y los 740 m/s, relacionada con la capa de depósitos y fragmentos piroclásticos de andesitas basálticas o roca muy densa (Tabla 4 y 5), fracturada y con presencia de alteración hidrotermal, lo que causa que la velocidad de las ondas superficiales que se propagan en el subsuelo disminuyan con la profundidad.

- Secuencia S2: A profundidades entre los 22 a 27 m y 57 m, con  $V_s > 740$  m/s, se relaciona con la capa andesítica basáltica a andesita, sana o consolidada de la formación andesita El Azufre y grupo Complejo Volcánico, valores promedios reportados en la Tabla 4, para materiales rocosos.

Con base en la información litológica del pozo exploratorio El Azufre, se asume la presencia de una capa de pequeños lentes de ceniza volcánica a una profundidad de 18 m y de espesor de 5.5 m, que corresponde con una capa de baja velocidad de la onda S, que podría variar entre 180 y 202 m/s (Tabla 4). Sin embargo, es importante mencionar que, debido a la resolución espacial del método sísmico, no es posible determinar capas con espesores menores a la longitud de la separación entre los geófonos del tendido sísmico, es decir, la longitud de onda mínima detectable es aproximadamente igual a la separación de los geófonos (Socco y Scrobbia, 2004). En este caso, la separación de los geófonos de los datos adquiridos en el CGLTV fue de 10 m, por lo que no es posible determinar estructuras de espesores menores a los 10 m, como es el caso de la capa de lentes de ceniza volcánica. (Socco and Strobbia, 2004)



**Figura 59. a).** Modelo 1D de la velocidad de la onda S, de la línea 2 cerca del pozo El Azufre y a 730m de distancia del primer punto de medición del perfil sísmico. La zona gris indica el rango de profundidad interpretable con el método MASW. **b).** Modelo 2D de la velocidad de la onda S, de la línea 2, correlacionado con el pozo el Azufre. S1: Secuencia de flujo piroclásticos. S2: Secuencia de andesitas consolidadas de la formación El Azufre.

Las secuencias S1 y S2 se distribuyen a lo largo del modelo 2D completo de  $V_s$  del perfil 1 (Figura 47). Las anomalías de la velocidad de la onda de corte  $V_s > 900$  m/s, pueden estar relacionadas con:

- La presencia de cuerpos intrusivos sepultados, depósitos piroclásticos u otros cuerpos volcánicos que pueden estar atrapados en el subsuelo a profundidad. Es importante tener en cuenta que el CVLTV se trata de un medio volcánico con actividad geológica reciente, por lo que es posible la existencia de estos cuerpos a profundidades someras, que pueden llegar a ser detectables por el método de análisis de ondas superficiales.
- La presencia de alteración hidrotermal o el paso de fluidos geotermales a través de las rocas del subsuelo. La interacción por un largo periodo de tiempo de la relación fluido-roca puede dar lugar a cambios en las propiedades físicas o químicas de las rocas, lo que ocasiona cambios en la velocidad de la propagación de las ondas superficiales y dificulta la determinación precisa del valor de la velocidad de la onda de corte de cada capa estratigráfica.
- La variación abrupta en el nivel topográfico. Estos cambios afectan la velocidad de propagación de las ondas superficiales y tiempo de arribo de las ondas, lo que puede generar interpretaciones erróneas de la selección del modo fundamental de las curvas de dispersión.
- Finalmente, las anomalías también pueden ser ocasionadas por fallas o zonas de fracturas poco profundas  $< 60$  m, sin embargo, en las zonas anómalas no se ha reportado evidencia de fallas superficiales.

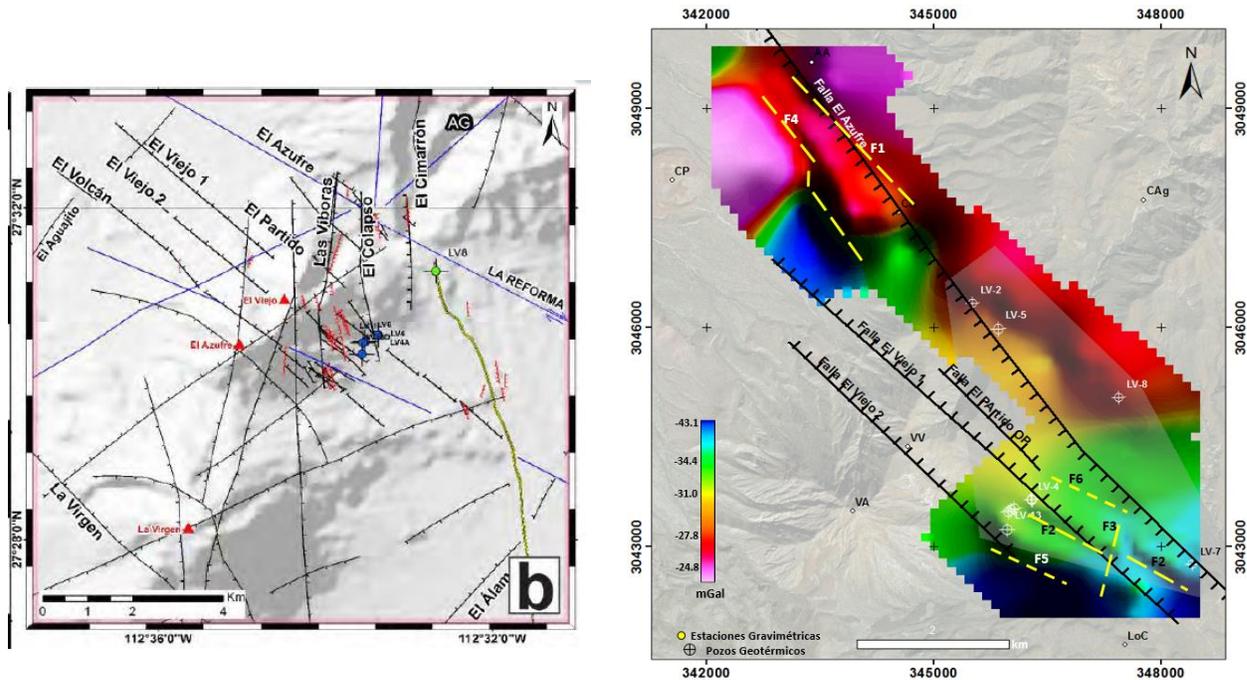
Para dar una certera interpretación, se debe apoyar cualquiera de estas teorías con la aplicación de otro método geofísico de análisis superficial del subsuelo, por ejemplo, eléctricos. La mayoría de los trabajos geofísicos que se han realizado dentro del CVLTV tienen el objetivo de caracterizar el subsuelo a grandes profundidades y se han aplicado algunos métodos de investigación somera, entre ellos, sondeos eléctricos verticales (SEV) y transitorio electromagnético en el dominio del tiempo (TDE), pero los resultados, muestran una profundidad mínima de investigación  $\approx 80$  m, por lo que no es posible realizar una comparación directa de éstos, con los resultados obtenidos del análisis de las ondas superficiales (MASW), que permite determinar el comportamiento del subsuelo en los primeros 60 m de profundidad.

## 4.2. Método gravimétrico

### 4.2.1. Correlación de las fallas interpretadas con el método gravimétrico

Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013) realizaron la actualización del modelo conceptual del CGLTV a partir de datos de microsismicidad, en el que se incluye una serie de fallas que afectan el sistema tectónico del CVLTV (Figura 13), principalmente las fallas El Azufre, El Viejo 1, El Viejo 2 y El Partido, posteriormente Antayhua-Vera (2017), realizó una recopilación de estos modelos y ubicó el principal sistemas de fallas normales (Figura 60. a).

En el capítulo anterior se presentaron los resultados de la interpretación de las anomalías gravimétricas en un sector dentro y fuera del CGLTV (Figuras 48 a 52), en los que se identificaron 5 fallas en dirección NW-SE y una falla perpendicular, F3, en dirección NE-SW y se definieron los bordes estructurales de 9 cuerpos dentro de un sector del CVLTV.



**Figura 60. a)** Mapa tectónico local del CVLTV, sintetizado de estudios de López et al, 1993; Benton et al, 2011; Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2012, 2013. Las líneas negras representan el sistema de fallas y fracturas. Modificado de Antayhua-Vera (2017). **b)** Mapa de ABC, fallas del CVLTV (líneas negras) tomadas de Antayhua-Vera (2017), fallas interpretadas F1 a F6 (líneas amarillas segmentadas). Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos gravimétricos. Pozos geotérmicos (círculos blancos). Geometría del campo geotérmico (polígono gris). SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevel.

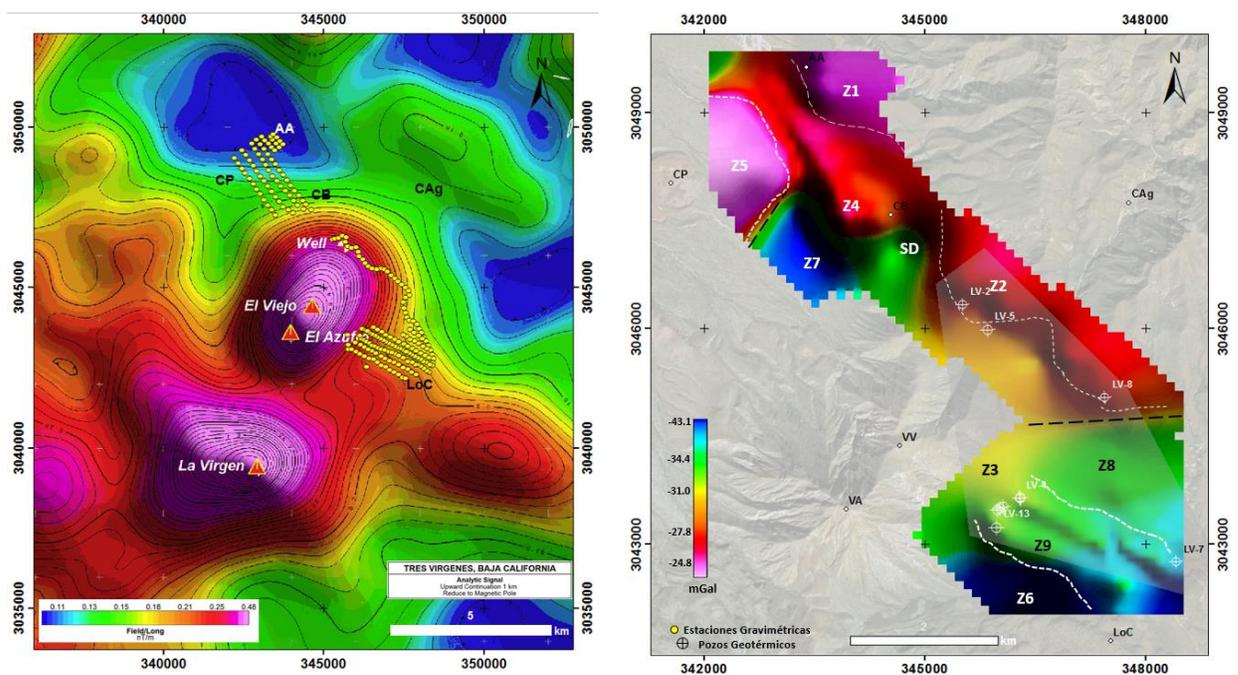
Correlacionando la dirección las fallas propuestas en la literatura (Figura 60. a) con el sistema de fallas interpretado (Figura 61. b), se encuentra que: (Macías-Vázquez and Jiménez-Salgado, 2012)

1. La falla F1 de alto ángulo, podría relacionarse con la falla El Azufre, de dirección NW-SE, se infiere que la falla se extiende hacia el SE del CGLTV, separando la caldera El Aguajito del volcán El Viejo. Superficialmente, la falla está ubicada en el arroyo El Azufre que se extiende desde la parte norte del CVLTV hasta el volcán El Viejo. F1, separa la caldera El Aguajito y la estructura Z4, por lo que la falla es más reciente que dichas estructuras.
2. La falla F2, podría relacionarse con la falla El Viejo 1, de dirección NW-SE, que corta la estructura en la que se encuentran los pozos productores LV-3 y LV-4, por lo que se considera como una de las fallas más importantes del CVLTV.
3. La falla F3, de dirección NE-SW, corta a la estructura Z9 de forma perpendicular. La falla F4 de tipo escalonada, de dirección NW-SE, separa las estructuras Z4 y Z5, estas estructuras no han sido identificadas por otros autores, probablemente debido a que la mayoría de los estudios gravimétricos que se han realizado en el CVLTV son regionales y debido a la separación amplia de las estaciones, no es posible ver con mayor detalle algunas estructuras pequeñas a profundidad.
4. La falla F5, podría relacionarse con la falla El Viejo 2, de dirección NW-SE, que corta la estructura en la que se encuentran el pozo productor LV-13D en las faldas del volcán El Viejo. El bloque de caída de la falla F5 es hacia la izquierda, de manera inversa a la mayoría de las fallas reportadas.
5. La falla F6, podría relacionarse con la falla El Partido, de dirección NW-SE, al este de la zona de los pozos productores.

En el caso de las fallas en dirección NW-SE, interpretadas, se extiendan hacia el SE del CVLTV; este grupo de fallas junto con las fallas El Campamento y La Reforma, coinciden con los sistemas de fallas asociados a la apertura del Golfo de California, que probablemente corresponden a la prolongación de la estructura de la cuenca de Guaymas (Avellán et al., 2018).

#### 4.2.2. Anomalía gravimétrica y magnética

Se han publicado algunos estudios gravimétricos regionales realizados dentro del CVLTV, entre ellos los publicados por López et al. (1993), (Figura 5). Recientemente Avellán et al. (2018), realizaron un estudio del análisis de datos aeromagnéticos dentro del CVLTV (Figura 61. a) y publicaron un mapa de señal analítica de la anomalía magnética reducido al polo continuada 1000 m hacia arriba. A partir de las anomalías gravimétricas y magnéticas, se puede concluir principalmente que éstas guardan una relación inversa, es decir, los bajos gravimétricos corresponden con los altos magnéticos y viceversa, esta relación se ve principalmente en el caso de las estructuras caldéricas y volcánicas del CVLTV. En la Figura 62. B, se presentan los cuerpos interpretados en este trabajo, a partir de las anomalías gravimétricas. (Avellán et al., 2018)



**Figura 61. a)** Mapa de señal analítica de la anomalía magnética reducido al polo continuada 1000 m hacia arriba, estaciones gravimétricas (puntos amarillos). Modificado de Avellán et al. (2018). **b)** Mapa de ABC, Z1 a Z9, representan estructuras geológicas interpretadas. Los colores azules representan valores bajos y los fucsias altos magnéticos y gravimétricos. Pozos geotérmicos (círculos blancos). Geometría del campo geotérmico (polígono gris). SD. Zona sin estaciones gravimétricas. CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agría. CAG. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.

Realizando una comparación de la interpretación de las anomalías gravimétricas (Figura 62. b) con la anomalía magnética reportada por Avellán et al, 2018, se tiene que:

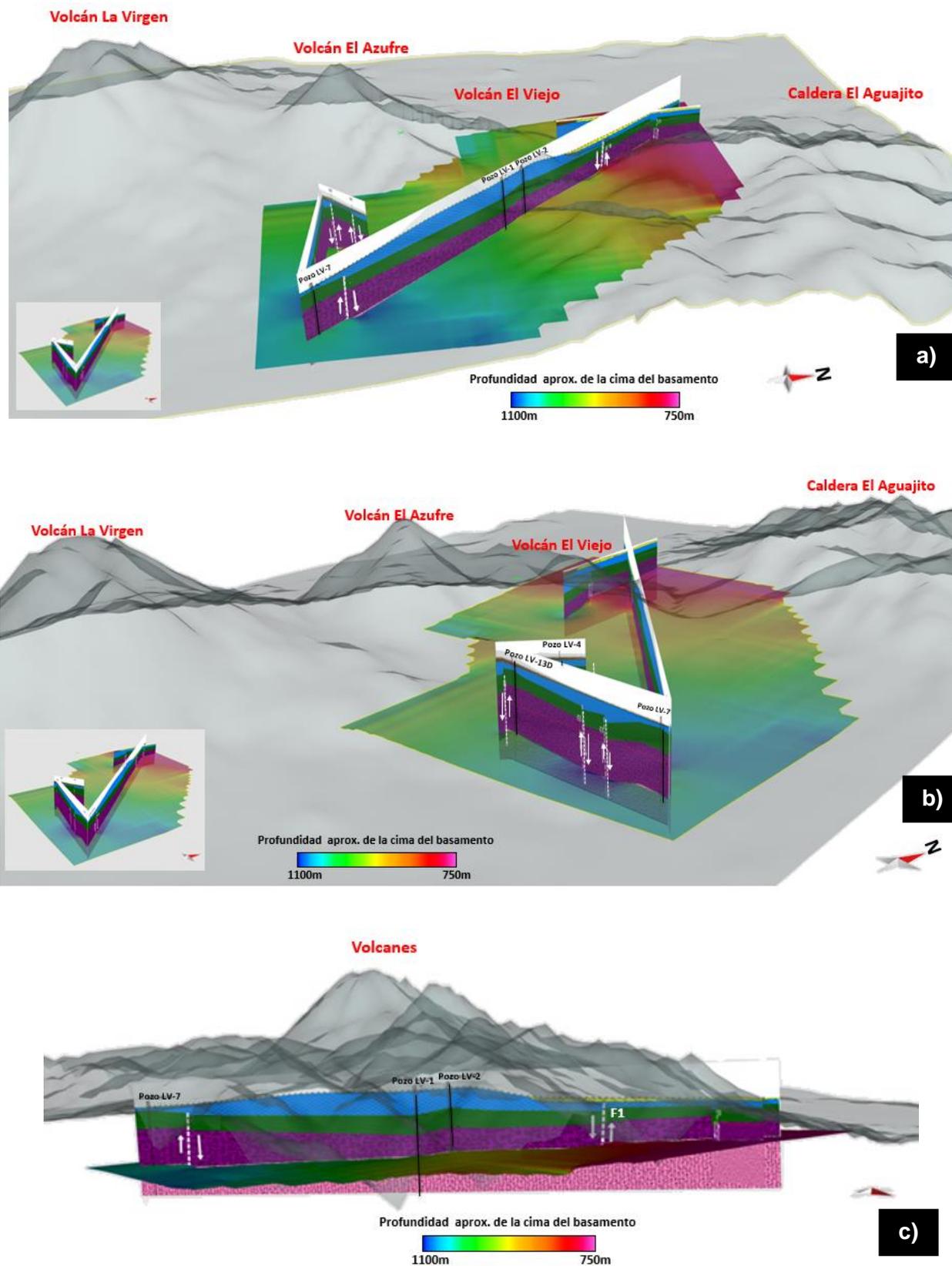
- Las zonas de las anomalías gravimétricas altas, Z1 y Z2, delimitan la parte oeste de la caldera El Aguajito y la zona de transición entre el volcán El Viejo y la caldera, la anomalía aumenta hacia el centro de la caldera, conforme se hace más densa la estructura. En esta zona se observan bajos a intermedios magnéticos, que también podrían extenderse hacia la caldera La Reforma. La manifestación hidrotermal Agua Agria (Z1), al norte de la caldera El Aguajito, representa un alto gravimétrico y es separada de los volcanes por la falla El Azufre (F1), por lo que se puede establecer que las manifestaciones geotérmicas son estructuralmente controladas por los sistemas de fallas que permiten el ascenso de los fluidos termales.
- La zona de anomalías gravimétricas bajas, Z3, que varía entre -27.5 mGal a -31mGal, disminuye hacia el centro del CVLTV, donde se encuentran los volcanes La Virgen, El Viejo y El Azufre, este mínimo gravimétrico puede estar relacionado con el hundimiento del basamento asociado al engrosamiento de las formaciones volcánicas de menor densidad sobre éste; mientras que la anomalía magnética en este caso es alta y se relaciona con los centros de expansión a través de los cuales asciende el magma y hay minerales de alteración. La diferencia de las anomalías gravimétricas entre la zona de los volcanes y las calderas del CVLTV se debe a la diferencia de origen y evolución tectónica.
- La zona de anomalía gravimétrica alta, Z4, al oeste de Cerro Blanco en dirección NW-SE, se encuentra cerca de la formación superficial Domo de lava de dacitas El Viejo (Figura 3), en los flancos del volcán El Viejo. Es una zona de transición entre los altos y bajos magnéticos, pero esta estructura no está definida en los estudios magnéticos.
- La zona de anomalía gravimétrica alta, Z5, podría estar relacionado con la estructura Cerrito Prieto que sobresale superficialmente y perteneciente a la formación Basalto Esperanza, hace parte de un bajo magnético que se extiende hacia el NE de la estructura y que limita con la caldera El Aguajito.
- La zona de anomalías gravimétricas bajas, Z6 y Z7, menor a los -43.1 mGal, cerca de la loma Cuevegel de lava andesítica y los flancos del volcán El Viejo, estas zonas corresponden con altos magnéticos que podrían estar relacionados con la fuente que genera las anomalías de los volcanes.

- Las anomalías gravimétricas de valores intermedios a bajos, Z9, se trata de una estructura, que se encuentra segmentada por las fallas F2, F3, F5 y F6, relacionadas probablemente con la distribución de los pozos productores del CGLTV. Esta estructura se encuentra la zona de altos magnéticos, sin embargo, en estos estudios no se observa los límites de esta estructura, probablemente porque se trata de un trabajo regional.

Adicionalmente, Avellán et al. (2018) proponen que las fuentes anómalas del volcán La Virgen y los volcanes El Azufre y El Viejo están separadas posiblemente por la extensión de la falla el Campamento, sin embargo, esto no puede ser confirmado con nuestros datos gravimétricos, debido a la falta de estaciones en esta área.

#### **4.2.3. Rasgos estructurales a profundidad**

Los modelos bidimensionales construidos a partir de la anomalía de Bouguer completa (ABC), la geología superficial y de la información de las columnas litológicas de los pozos perforados dentro del CGLTV, evidencian una depresión estructural del basamento granodiorítico bajo el volcán El Viejo, en forma de graben, que puede extenderse hacia el volcán El Azufre y La Virgen, esta estructura también ha sido reportado por Benton et al. (2011) y Wong-Ortega (2000), con base en otros estudios. Antayhua-Vera (2017), a partir de estudios de aeromagnéticos, estableció que el CGLTV se encuentra ubicado dentro de una depresión limitada por las fallas: Mezquital, La Virgen, La Reforma-El Azufre, El Aguajito y El Álamo, que limitan el área de explotación geotérmica y establece que la profundidad del basamento magnético se encuentra entre 0.9 y 2.2 km. Avellán et al. (2019), por su parte calcula la profundidad de la fuente magnética en la región entre 1.7 km y 2.4 km con respecto a la altura máxima del CVLTV. Las fallas interpretadas en los modelos gravimétricos, permiten reconstruir estructuras tipo horts, que afectan el subsuelo hasta el basamento (García y González, 1998), (Figura 62).

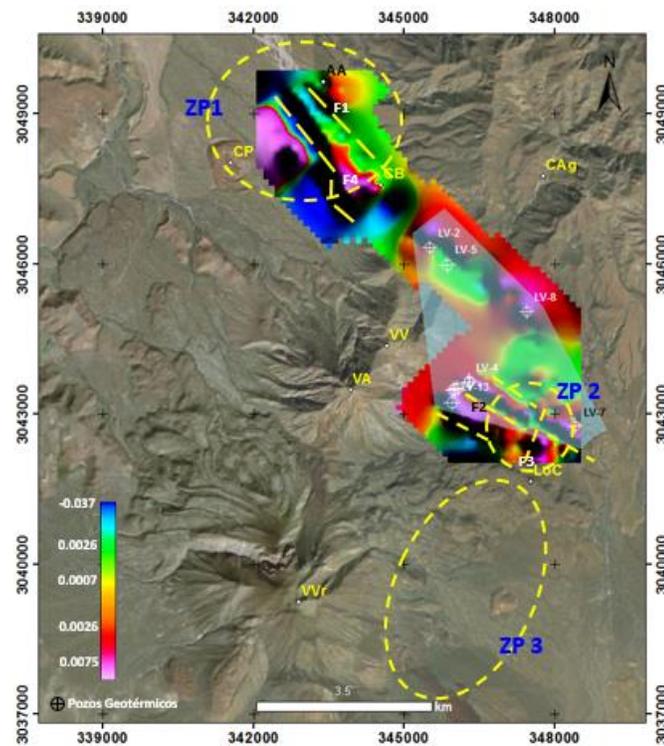


**Figura 62. a) b) c)** Diferentes perspectivas del modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV), construido a partir de los modelos gravimétricos, en el que se evidencia el sistema estructural en forma de graben del basamento granodiorítico y las estructuras superiores tipo horts.

Los modelos 1 y 2 (Figura 54 y 55), del capítulo de resultados, representan la distribución de la estructura Z9, que es cortada por el sistema de fallas interpretadas F2, F5 y F6, que definen la estructura en forma de horts en dirección SW-NE. En el modelo 3 (Figura 56), se observa que el punto más profundo del graben se encuentra debajo del volcán El Viejo, mientras que el basamento, se hace más somero hacia el sur de las estructuras volcánicas, cerca de la manifestación hidrotermal Agua Agria. Entre los pozos LV-1 y LV-2, no se interpretaron fallas, sin embargo, existe un levantamiento de los estratos en la zona del pozo LV-2, que podría ser atribuido a un sistema de fallas que cortan al modelo en dirección NE-SW, probablemente relacionadas con la falla Las Víboras y la falla El Colapso, reportadas por Antayhua-Vera (2017). En el modelo 4 (Figura 57), se observa particularmente, el hundimiento del basamento granodiorítico, direccionado hacia los volcanes.

### 4.3. Áreas de oportunidad

Con base en la integración de los estudios geofísicos realizados y el análisis del sistema estructural del CVLTV, se ubican tres áreas de oportunidad, las cuales se definen como posibles propuestas de extensión del potencial geotérmico (Figura 63):



**Figura 63.** Mapa de la primera derivada vertical en el que se identifican las tres zonas propuestas de expansión del CGLTV (círculos amarillos). Zonas de expansión (ZP1, ZP2, ZP3). Las fallas interpretadas F1 a F6 (líneas amarillas segmentadas). Pozos geotérmicos (círculos blancos). Geometría del campo geotérmico (polígono azul). CP. Cerrito Prieto. AA. Manifestación hidrotermal Agua Agria. CAg. Caldera El Aguajito. VV. Volcán El Viejo. VA. Volcán El Azufre. CB. Cerro Blanco. LoC. Loma Cuevegel.

**Zona 1. (ZP1). En dirección hacia la manifestación hidrotermal Agua Agria**

El basamento granodiorítico y reservorio geotérmico se encuentra más somero en esta dirección, como se ve reflejado en los modelos propuestos. En la zona ZP1, se encuentran varias manifestaciones termales, entre ellas la manifestación hidrotermal Agua Agria que alcanza una temperatura superficial que oscila entre 53 y 98°C, la cual está asociada al sistema de fallas y fractura que permiten el ascenso de los fluidos, principalmente están ligadas a la falla El Azufre, identificada con el método gravimétrico como la falla inferida F1. Es posible que el proceso de perforación sea más sencillo de realizar en esta zona, dado que el recurso objetivo se encuentra a una menor profundidad con respecto al CGLTV, lo que podría implicar menos gastos de operatividad, sin embargo, es importante considerar que el obstáculo de esta propuesta radica en el difícil acceso topográfico y que se tendrían que habilitar una serie de caminos que permitan el acceso de los equipos de perforación.

**Zona 2. (ZP2). En la parte sur del CGLTV**

Esta zona se encuentra cerca de los pozos productores LV-3, LV-4 y LV-13D del CGLTV, cuya productividad depende del sistema de fallas en dirección NW-SE, entre ellas las fallas El Viejo 2, El Viejo 1 y El Partido, que corresponden con las fallas inferidas F5, F2 y F6, respectivamente. Sin embargo, en este proyecto se propone la construcción de un pozo que intercepte el sistema estructural fracturado por las fallas inferidas F2 y F3 particularmente, para permitirían un mejor ascenso de los fluidos geotérmicos, sin que afecte la zona de productiva de los otros pozos perforados.

**Zona 3. (ZP3). Hacia el volcán La Virgen**

En este caso se plantea la expansión del CGLTV, en dirección al volcán El Azufre y principalmente hacia el volcán La Virgen, debido a que las principales características de la anomalía gravimétrica y magnética que se identificaron para el volcán El Viejo, donde se encuentra el área de exploración del campo geotérmico, se extienden hacia las otras dos estructuras volcánicas. Además, el volcán La Virgen es un sistema volcánico y estructural activo, que indica que hay una mejor conexión de las fallas y fracturas que puedan permitir el ascenso de los fluidos, lo cual representa uno de los principales problemas del campo actualmente, además de la baja permeabilidad y la falta de recarga activa.

Para llevar a cabo la expansión del CGLTV y la perforación de nuevos pozos, es necesario cumplir con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Sección V, Evaluación del impacto

ambiental, Art. 28), nueva ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988 (Cámara de diputados del H. Congreso de la unión; Secretaria de Servicios Parlamentarios; Dirección General de Servicios de Documentación, Información y Análisis, 2012), a partir de los cuales se puede estimar el impacto ambiental que generan estas actividades; algunas de las peticiones que se realizan, para llevar a cabo nuevas actividades son:

1. Restauración ecológica de vegetación, que involucra la recuperación de la vegetación extraída para la construcción de caminos de acceso a la zona y áreas donde se encuentran los pozos, para plantarla en otras zonas en las que puedan continuar su proceso de crecimiento.
2. Mantener los niveles de ruido adecuado, de acuerdo a la norma oficial mexicana. En operación normal se alcanzan los 70 decibeles en Las Tres Vírgenes, que es considerado como un valor promedio, que no afecta al municipio, ni al medio ambiente.
3. Controlar los residuos líquidos y sólidos, producidos por los trabajos de perforación y en las áreas de trabajos locales, para lo que se opta por la construcción de presas que permitan usar estos residuos.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

### 5.1. Métodos sísmicos

- Los perfiles de sísmica de reflexión dentro del campo geotérmico Las Tres Vírgenes permitieron identificar dos secuencias limitadas por sismorefltores de amplitudes diferentes, correlacionadas con las columnas litológicas de los pozos. La secuencia de amplitudes altas alcanza los 400 ms (*TWTT*) de profundidad y está relacionada con el Grupo Complejo Volcánico. La secuencia de amplitudes bajas está asociada a la Formación Santa Lucía.
- Las imágenes de sísmica de reflexión definieron un sistema de fallas asociado a la apertura del Golfo de California y al emplazamiento del sistema volcánico, a través del cual ascienden los fluidos hidrotermales (ventilas hidrotermales), que en las secciones sísmicas se evidencian como sectores de bajas amplitudes.
- El método de análisis multicanal de onda superficiales (MASW, por sus siglas en inglés) mostro dos secuencias estratigráficas correlacionadas con las columnas litológicas del pozo somero El Azufre y el pozo perforado LV-2, donde la primera secuencia está relacionada con la capa de andesitas basálticas a andesitas afectadas por procesos hidrotermales y la segunda a la formación andesita El Azufre. No se revelaron anomalías relacionadas con la presencia de fallas superficiales.
- Los resultados del método sísmicos MASW, se ven en el caso de los perfiles quebrados, debido a que al no estar los geófonos dispuestos en la superficie de manera equidistante y de forma lineal, se genera un cálculo inadecuadamente de los puntos de reflejo común (CMP) y por lo tanto una inadecuada interpretación de las curvas de dispersión.

### 5.2. Método gravimétrico

- Los mapas de anomalías gravimétricas permitieron identificar un sistema de 5 fallas en dirección NW-SE, una falla perpendicular NE-SW. El sistema de fallas F5, F2 y F6 que se extiende principalmente en la zona de los pozos productores LV-3, LV-4 y LV-13D, podrían estar relacionadas con las fallas El Viejo 2, El Viejo 1 y El Partido. La falla F1, cerca de la manifestación

Agua Agria, podría correlacionarse con la falla El Azufre, y confirmaría que las manifestaciones hidrotermales del CVLTV están estructuralmente controladas por los sistemas de fallas.

- Los modelos verticales bidimensionales gravimétricos construidos a partir de la interpretación de la anomalía de Bouguer completa, la geología superficial y la información de las columnas litológica de los pozos perforados dentro del CGLTV, permitieron crear un modelo en el que se puede identificar la existencia de una depresión o graben bajo el volcán El Viejo que se extiende probablemente hacia el volcán El Azufre y el volcán La Virgen y estructuras tipo horts en dirección del basamento granodiorítico, que se correlacionan con los modelos planteados en la literatura.
- Existe una relación inversa entre las anomalías gravimétricas y magnéticas, la cual se evidencia principalmente en la zona de los volcanes del CVLTV, donde se marca un bajo gravimétrico y alto magnético, mientras que la caldera El Aguajito, se tiene un alto gravimétrico y un bajo magnético, esto marca la zona de transición entre estas estructuras, que además están separadas lateralmente por la falla El Azufre (F1).
- La interpretación del sistema de fallas realizada en este estudio, permite hipotetizar que la recarga del reservorio geotérmico de Las Tres Virgenes ocurrió a través de este sistema, que permitió la infiltración de agua fósil y meteórica en las zonas.
- La integración de los datos sísmicos y gravimétricos, permitieron identificar el sistema estructural del complejo volcánico Las Tres Virgenes y proponer tres áreas de oportunidad y de extensión del campo geotérmico. para aprovechar en gran medida el recurso geotérmico, no solo para producir energía eléctrica, sino también, para la implementación de los usos directos que beneficien directamente a la población.

### 5.3. Recomendaciones

Considerando el trabajo desarrollado de adquisición, procesamiento e interpretación de datos sísmicos y gravimétricos dentro del CVLTV, se plantean las siguientes recomendaciones:

1. Realizar un estudio más detallado del flujo de trabajo, filtros y atributos sísmicos, que permitan mejorar la calidad las imágenes de sísmica de reflexión en ambientes volcánicos, en los que además se usan fuentes convencionales y no de alta resolución.
2. Realizar estudios geofísicos de investigación somera, entre ellos, sondeos eléctricos verticales (SEV) y transitorio electromagnético en el dominio del tiempo (TDE), para definir el comportamiento del subsuelo en los primeros 60 m de profundidad y poder correlacionar la información con los resultados obtenidos de MASW.
3. Para estimar la profundidad del basamento mediante el método de análisis espectral de la anomalía gravimétrica, es necesario ampliar el estudio a un proyecto regional. Además, para constreñir los modelos publicados en este trabajo, podría combinarse con otros estudios de magnetometría dentro del CVLTV.
4. Considerar que el CGLTV presenta problemas en la explotación del recurso geotérmico, debido a la baja permeabilidad y la falta de recarga. Por lo mismo, se recomienda continuar con la exploración geológica, geoquímica y geofísica en el CVLTV, para definir los bordes de las estructuras propuestas y las dimensiones del graben, sobre el que se encuentran los volcanes del CVLTV y corroborar el sistema de fallas inferido. Igualmente se recomienda extender los estudios hacia la caldera El Aguajito (donde se localiza la manifestación hidrotermal Agua Agria), el volcán La Virgen y el sector sur del campo geotérmico, que permitan identificar la presencia de una nueva área de interés y la viabilidad para expandir el potencial actual del CGLTV.
5. Incentivar el aprovechamiento integral del potencial geotérmico del CVLTV tanto para la generación de energía eléctrica como en la implementación de usos directos de la geotermia, lo que podría beneficiar en mayor medida al municipio de Mulegé.

## Literatura citada

---

- Antayhua-Vera, Y. T. 2017. Caracterización Sismológica, Aeromagnética y Magnetotelúrica Del Campo Volcánico y Geotérmico de Las Tres Vírgenes (B.C.S.), México. p. 255.
- Avellán, D. R., Macías, J. L., Arce, J. L., Jiménez-Haro, A., Saucedo-Girón, R., Garduño-Monroy, V. H., Sosa-Ceballos, G., Bernal, J. P., López-Loera, H., Cisneros, G., Layer, P. W., García-Sánchez, L., Reyes-Agustín, G., Rocha, V. S., Rangel, E. 2018. Eruptive chronology and tectonic context of the late Pleistocene Tres Vírgenes volcanic complex, Baja California Sur (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 360, 100–125. doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.06.012
- Avellán, D. R., Macías, J. L., Arce, J. L., Saucedo-Girón, R., Garduño-Monroy, V. H., Jiménez-Haro, A., Sosa-Ceballos, G., Cisneros, G., Bernal, J. P., Layer, P. W., García-Sánchez, L., Reyes-Agustín, G., Rangel, E., Navarrete, J. A., López-Loera, H. 2019. Geology of the late Pleistocene Tres Vírgenes Volcanic Complex, Baja California Sur (México). *Journal of Maps*, 0(0), 1–11. doi:10.1080/17445647.2019.1576552
- Barragán, R. M., Iglesias, E., Torres, R. J., Arellano, V. M., Reyes Picasso, N., Ramírez, M., Tapia, R., Hernández, P. 2010. Cambios geoquímicos en fluidos del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, durante 1997-2007: Identificación de procesos de yacimiento. *Geotermia*, 23(2), 24–32.
- Batista-Cruz, R. Y., Rizzo, A. L., Grassa, F., Bernard Romero, R., González Fernández, A., Kretzschmar, T. G., Gómez-Arias, E. 2019. Mantle Degassing Through Continental Crust Triggered by Active Faults: The Case of the Baja California Peninsula, Mexico. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1912–1936. doi:10.1029/2018GC007987
- Bentón, A., García, F., Silis, J., & Cruz, S. 2011. Estudio hidrogeológico de la cuenca de Las Tres Vírgenes, B.C.S. Gerencia de proyectos termoeléctricos, CFE.
- Bertani, R. 2016. Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report. *Geothermics*, 60, 31–43. doi:10.1016/j.geothermics.2015.11.003
- Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión; Secretaria de Servicios Parlamentarios; Dirección General de Servicios de Documentación, Información y Análisis. 2012. Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. *Última reforma DOF* (pp. 04-06).
- Cruz Hernández, F. 2012. Inversión conjunta de dispersión de ondas superficiales y sondeos geoeléctricos de corriente directa. Tesis de Maestría en ciencias. CICESE. 127 pp.
- Elkins, T. 1951. The second derivative method of gravity interpretation. *Geophysics*. 16(1), 29-50.
- Estrada, L. A. 2012 Prospección Gravimétrica. *Tucuman: Facultad de Ciencias exactas y tecnología. Departamento de geodesia y topografía* 30 pp.

- Federal Emergency Management Agency. (2003). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. Fema. Part1: Provisions, FEMA 368, Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C. Recuperado en 2018 de: [https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=0f9OdDOBmJEC&oi=fnd&pg=PA1&dq=NEHRP+Recommended+Provisions+for+seismic+Regulations+for+New+buildings+and+other+Structures&ots=mA7tAWQUig&sig=zyG2ju\\_3L\\_fr0chXGtTj42JkYec&redir\\_esc=y#v=onepage&q=NEHRP%20Recommended%20Provisions%20for%20seismic%20Regulations%20for%20New%20buildings%20and%20other%20Structures&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=0f9OdDOBmJEC&oi=fnd&pg=PA1&dq=NEHRP+Recommended+Provisions+for+seismic+Regulations+for+New+buildings+and+other+Structures&ots=mA7tAWQUig&sig=zyG2ju_3L_fr0chXGtTj42JkYec&redir_esc=y#v=onepage&q=NEHRP%20Recommended%20Provisions%20for%20seismic%20Regulations%20for%20New%20buildings%20and%20other%20Structures&f=false)
- Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G. E. 2007. Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(11–12), 1313–1336. doi:10.1130/B26067.1
- Flores-Armenta, M., Ramírez Montes, M., Morales Alcalá, L. 2014. Geothermal activity and development in México – Keeping the production going. “Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization, 23–29.
- García Fiscal, S. 2013. Anomalías gravimétricas de origen geotérmico: caso campo geotérmico de Cerro Prieto. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE.
- 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*.
- Garduño Monroy, V. H., Vargas Ledezma, H., Campos Enriquez, J. O. 1993. Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito (Baja California, Mexico): a resurgent-type caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59(1–2), 47–58. doi:10.1016/0377-0273(93)90077-5
- Geosoft Oasis Montaj. 2010. Montaj Gravity & terrain correction. Geosoft Oasis Montaj.
- Gómez, J., Soto, J., & Sandoval, F. 2010. Modelo geotérmico actualizado del C. G. Las Tres Vírgenes, B.C.S. Gerencia de proyectos geotermoelectricos, CFE.
- Gutiérrez Negrín, L. 2015. Mexican Geothermal Plays. *World Geothermal Congress 2015*, (April), 19–25.
- Hayashi, K. 2003. *Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods*. 1–106.
- Hayashi, K., Suzuki, H. 2004. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data. *Exploration Geophysics*, 35(1), 7–13. doi:10.1071/EG04007
- Hiriart Le Bert, G., Gutiérrez Negrín, L. C. a., Quijano León, J. L., Ornelas Celis, A., Espíndola, S., Hernández, I. 2011. Evaluación de la Energía Geotérmica en México. *Comisión Reguladora de Energía*, 164.
- Humire Guarachi, F., Sáez Robert, E., & Leyton Flórez, F. 2015. Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30. Instituto de La Construcción Ed.
- IBC. 2012. International Building Code. Recuperado en 2018 de: <https://www.iccsafe.org/products-and-services/i-codes/2018-i-codes/ibc/>

- Kane, M. 1962. A Comprehensive System of Terrain Corrections Using a Digital Computer. *Geophysics. Terrain*, XXVII(4), 455–462.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2013. *An Introduction to Geophysical Exploration*. John Wiley & Sons.
- Linares, G. 2005. Introducción y aplicación del método de sismica de microtremores en áreas urbanas. Informe Final de Cursos en Cooperación, Universidad Simón Bolívar.
- Longman, I. M. 1959. Formulas for computing the tidal correction due to the moon and the sun. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2351–2356.
- López, Aida, Casarrubias, Z., & Leal, R. 1993. Estudio Geológico regional de la zona geotérmica de Tres Vírgenes, BCS. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE.
- López-Hernández, A., García Estrada, G. H., Arellano Guadarrama, F. J. 1995. Geothermal exploration at Las Tres Vírgenes, B.C.S., Mexico. *World Geothermal Congress*, 707–712.
- Lorenzo-Pulido, C., Soto-Peredo, J. 2013. Sismicidad en el complejo volcánico de Las Tres Vírgenes, B. C. S. *Geotermia*, 26(1), 34–43.
- Louie, J. N. 2001. Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347–364. doi:10.1785/0120000098
- Macías-Vázquez, J. ., Jiménez-Salgado, E. 2012. Actualización vulcanológica del complejo de Las Tres Vírgenes, BCS. *Geotermia*, 26(1), 26–28.
- Macías Vázquez, J. L., Jiménez Salgado, E. 2013. Estudio de Estratigrafía y Geología del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. *Geotermia*, 26(1), 14–23.
- Mendoza Santa Maria, J. N. 2015. Uso de la refracción sísmica y análisis multicanal de análisis de ondas superficiales para la determinación de modulos elásticos, en la finca Viento Blanco, San Vicente Pacaya, Escuintia. Cobán.
- Nagy, D. 1966. The prism method for terrain corrections using digital computers. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 63(1), 31–39. doi:10.1007/BF00875156
- Northwest Geophysical Associates, Inc. 2004. GM-SYS Gravity/ Magnetic Modelling Software.
- Ortega Estupiñán, A. M. 2014. Modelo de fuentes de anomalías gravimétricas regional y locales del volcán Galeras , asociadas a su estado de actividad entre junio 2008 – abril de 2009 Modelo de fuentes de anomalías gravimétricas regional y locales del volcán Galeras , asociadas a su es. 92.
- Ortiz-Prieto, I., Lorenzo-Pulido, C. 2009. Quince años de monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S. *Geotermia*, 22(2), 28–34.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. 1998 SEG Annual Meeting.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800–808. doi:10.1190/1.1444590

- Park, C. B., Miller, R. D., Miura, H. 2007. Optimum field parameters of an MASW survey. *Proceedings of the Society of Exploration Geophysicists (SEG) Japan Tokyo*, 22, 23.
- Pérez, J. L. 2017. Estudio de microsismicidad en la caldera La Reforma del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, México. 101.
- Phillips, J. D. 2000. Locating magnetic contacts: A comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 19(1), 402–405. doi:10.1190/1.1816078
- Portugal, E., Birkle, P., Barragan, R. M., Arellano, V. M., Tello, E., Tello, M. 2000. Hydrochemical-isotopic and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Virgenes geothermal field, Baja California Sur, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 101(3–4), 223–244. doi:10.1016/s0377-0273(99)00195-x
- Prol-Ledesma, R. M., Arango-Galván, C., Torres-Vera, M. A. 2016. Rigorous Analysis of Available Data from Cerro Prieto and Las Tres Virgenes Geothermal Fields with Calculations for Expanded Electricity Generation. *Natural Resources Research*, 25(4), 445–458. doi:10.1007/s11053-016-9295-2
- Ritchter, A. (29 de Julio de 2019). THINKGEOENERGY. Obtenido de Global geothermal capacity reaches 14,900 MW – new Top 10 ranking of geothermal countries.
- Romo-Jones, J. M., Gutiérrez-Negrín, L. C., Sánchez-Cornejo, C., González-Alcántar, N., García-Gutiérrez, A. 2018. 2017 Mexico Country Report. *IEA Geothermal*, (February), 10.
- Romo-Jones, J., Wong Ortega, V., Vázquez González, R., Flores Luna, C. 2000. Conductividad Eléctrica Y Atenuación De Ondas De Coda En El Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes En Baja California Sur. *Unión Geofísica Mexicana*, 20(1), 21–29.
- Romo, J. M., Gómez-Treviño, E., Antonio-Carpio, R. G. 2005. New Magnetotelluric Response Functions for Geothermal Applications. (April), 24–29.
- Saibi, H., Aboud, E., Setyawan, A., Ehara, S., Nishijima, J. 2012. Gravity data analysis of Ungaran Volcano, Indonesia. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(5), 1047–1054. doi:10.1007/s12517-011-0303-x
- SCINTREX. 2012. CG-5 Scintrex Autograv System Operation Manual. 308. from [https://scintrexltd.com/wp-content/uploads/2017/02/CG-5-Manual-Ver\\_8.pdf](https://scintrexltd.com/wp-content/uploads/2017/02/CG-5-Manual-Ver_8.pdf)
- Sena Lozoya, E. B. 2019. Exploración sísmica y térmica somera y su correlación con columnas litológicas de pozos en la caldera La Reforma, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE. 131.
- Serna Vásquez, A. F. 2015. Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) en suelos residuales. 123.
- Socco, L. V., Strobbia, C. 2004. Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics*, 2(4), 165–185. doi:10.3997/1873-0604.2004015
- Talwani, M., Worzel, J., & Landisman, M. 1959. *Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone*. Palisades, New York: Lamont Geological Observatory, Columbia University.

- Telford, W. G., King, L. E., & Fraker, P. J. 1991. Evaluation of glucocorticoid-induced DNA fragmentation in mouse thymocytes by flow cytometry. *Cell proliferation*, 24(5), 447-459.
- Venegas Salgado, S., Arredondo Fragoso, J., Ramírez Silva, G., Flores Armenta, M., Ramírez Montes, M. 2006. Monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-4 y LV-13 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, México. *Geotermia*, 19(2), 13–22.
- Verma, S. P., Pandarinath, K., Santoyo, E., González-Partida, E., Torres-Alvarado, I. S., Tello-Hinojosa, E. 2006. Fluid chemistry and temperatures prior to exploitation at the Las Tres Vírgenes geothermal field, Mexico. *Geothermics*, 35(2), 156–180. doi:10.1016/j.geothermics.2006.02.002
- Viggiano Guerra, J. C., Sandoval Medina, F., Flores Armenta, M. C., Pérez, R. J., González Partida, E. 2009. Aplicación del SPCALC en la especiación química y termodinámica de fluidos: ejemplo del caso de los pozos LV-4A, LV-11 y LV-13, del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS. *Geotermia*, 22(1), 12–17.
- Wiederhold, H. 1991. Seismic methods. *Marine and Petroleum Geology*, 8(1), 118. doi:10.1016/0264-8172(91)90055-6
- Wong-Ortega, V. M. 2000. Estudio de sismotectónica, atenuación y tomografía sísmica en la región volcánica y geotérmica Las Tres Vírgenes.
- Yilmaz, O. 1987. Seismic data processing. *Investigations in geophysics*.
- Yilmaz, Ö. 2001. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. *Society of exploration geophysicists*.
- Zhang, H., Pham, D., Thornton, M. 2005. Coherent noise velocity analysis by phase-matching plus p-omega domain wave field transformation and its application in ground roll attenuation. *Society of Exploration Geophysicists - 75th SEG International Exposition and Annual Meeting, SEG 2005*, 2142–2145.