

**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**

**Modelo térmico y de conductividad eléctrica en la caldera
Tulancingo-Acocolco, Puebla**

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

Presenta:

Javier Avendaño Cortés

Ensenada, Baja California, México
2017

Tesis defendida por
Javier Avendaño Cortés

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. José Manuel Romo Jones
Codirector de tesis

Dr. Efraín Gómez Arias
Codirector de tesis

Dr. Enrique Gómez Treviño

Dr. Benjamín Barón Sevilla



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la
Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Javier Avendaño Cortés © 2017

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Javier Avendaño Cortés** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

Modelo térmico y de conductividad eléctrica en la caldera Tulancingo-Acocolco, Puebla

Resumen aprobado por:

Dr. José Manuel Romo Jones
Codirector de tesis

Dr. Efraín Gómez Arias
Codirector de tesis

La geotermia es una de las fuentes de energía renovable más prometedora y económicamente viable. Actualmente se ha dirigido la atención a nuevas fuentes geotérmicas como los Sistemas Geotérmicos Mejorados (Enhanced Geothermal System EGS) con los cuales se puede aprovechar el calor almacenado en rocas profundas, calientes y de muy baja permeabilidad. La caldera de Tulancingo-Acocolco, ha sido reconocida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como un sistema geotérmico de roca seca caliente y un candidato potencial para el desarrollo de un EGS. El presente estudio compara los modelos del subsuelo obtenidos al analizar el comportamiento de los campos de temperatura y de conductividad eléctrica en la zona geotérmica de Acocolco, en el sector de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2. Los modelos 1D se obtuvieron a partir de un modelado térmico puramente conductivo y un modelado de conductividad eléctrica. Con información reportada en la literatura acerca de las propiedades termofísicas vinculadas a las unidades de roca que integran las columnas litológicas de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 perforados en la zona, se desarrollaron modelos térmicos en 1D puramente conductivos para simular el comportamiento de las curvas de temperaturas registradas en ambos pozos. Los modelos térmicos obtenidos presentaron un buen ajuste con respecto a las temperaturas observadas, lo que indica que los valores utilizados de conductividad térmica fueron adecuados. Por otra parte se realizó una campaña para medir y obtener datos MT en 10 sitios colocados sobre dos perfiles orientados casi perpendicularmente. Dos de los sitios observados coinciden con la ubicación de los pozos exploratorios. Los modelos 1D de conductividad eléctrica obtenidos se generaron usando una inversión tipo Occam, la cual produce el modelo más simple que explica los datos. Los modelos de resistividad eléctrica indicaron zonas de muy baja resistividad ($5 \Omega m$) posiblemente asociadas a la alteración por minerales hidrotermales a una profundidad entre 100-200 m para el pozo EAC-1, y 250-300 m en el pozo EAC-2. Además se identificó una zona conductora en el pozo EAC-1 entre 1500-3000 m de profundidad.

Palabras clave: Sistemas geotérmicos mejorados, conductividad térmica, resistividad eléctrica, modelado térmico 1D, inversión 1D, Caldera Acocolco.

Abstract of the thesis presented by **Javier Avendaño Cortés** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth's Sciences with orientation in Applied Geophysics.

Thermal and electrical conductivity modeling in the Tulancingo-Acocolco caldera, Puebla

Abstract approved by:

Dr. José Manuel Romo Jones

Thesis codirector

Dr. Efraín Gómez Arias

Thesis codirector

Geothermal energy is one of the most promising and economically viable sources of renewable energy. Attention has now been directed to new geothermal sources such as Enhanced Geothermal Systems (EGS) with which heat can be harnessed in deep, hot and very low permeability rocks. The Tulancingo-Acocolco caldera has been recognized by the Comisión Federal de Electricidad (CFE) as a hot dry rock geothermal system and a potential candidate for the development of an EGS. The present study compares the thermal models obtained by analyzing the behavior of the temperature and electrical conductivity fields in the Acocolco geothermal zone in the EAC-1 and EAC-2 exploratory wells. The 1D models were obtained from purely conductive thermal modeling and electrical conductivity modeling. With the information reported in the literature of the thermo-physical properties associated with the rock units that integrate the lithological columns of the exploratory wells EAC-1 and EAC-2 drilled in the zone, 1D models were developed purely conductive to simulate the behavior of the temperature curves recorded in both wells. The obtained thermal models presented a good adjustment with respect to the observed temperatures, indicating that the values of thermal conductivity used were adequate. On the other hand, a campaign was carried out to measure and obtain MT data in 10 sites placed on two profiles (each profile with 5 sites) oriented almost perpendicularly. Two of the observed sites coincide with the location of the exploratory wells. The 1D models of electrical conductivity obtained were generated using an inversion type Occam, which produces the simplest model that explains the data. The models of electrical resistivity indicated areas of very low resistivity ($5 \Omega m$) possibly associated to the alteration by hydrothermal minerals to a depth between 100 to 200 m for the EAC-1 well and 250 to 300 m in the EAC-2 well. In addition, a conductive zone was identified in the EAC-1 well between 1500 to 3000 m depth.

Keywords: Enhanced geothermal system, thermal conductivity, electrical resistivity, finite volume, 1D Inversion, Acocolco caldera.

Dedicatoria

A Él, primigenio motor inmóvil, por permitirme entender una minúscula parte del fantástico diseño de este planeta.

A mi adorada hija Atalía Belem, por ser ejemplo, inspiración y razón para esforzarme siempre en ser un mejor padre y una mejor persona.

A mi amada Madre Doña Estela Cortés, por su infinito amor, sus constantes oraciones y su inquebrantable fe en mí.

A mis entrañables hermanos: Antonio, Soledad y Alfredo, por su apoyo y sus diferentes enseñanzas para disfrutar al máximo lo que la vida brinda.

A la memoria de mi querido padre Don Antonio Avendaño, por su ejemplo de tenacidad, perseverancia y optimismo.

A ustedes familiares, amigos y amigas, por hacerme saber con sus palabras y acciones que soy afortunado al contar con ustedes siempre.

Agradecimientos

Mi sincera gratitud al **pueblo de México**, pues los apoyos económicos que recibí, provenían de los recursos públicos.

Al **CICESE** y al **Posgrado en Ciencias de la Tierra** por brindarme un excelente entorno en el cual poder desarrollar mi especialización académica y el trabajo de investigación de mi tesis.

Al **CONACYT** por el apoyo económico que recibí durante dos años como **becario No. 338025**.

Al **CeMIE-Geo** (apoyo SENER/CONACYT 207032) por el apoyo económico recibido a través del proyecto de formación de recursos humanos (PRH) en su modalidad de: "Apoyo para la conclusión del trabajo de tesis de posgrado".

Al Dr. José Manuel Romo Jones y al Dr. Efraín Gómez Arias por aceptar dirigir mi trabajo de tesis y ser excelentes guías, pero sobre todo por la gran calidad humana que siempre han mostrado, el invaluable apoyo que siempre he recibido de ustedes, su infinita paciencia y su trato siempre atento y amable.

Al Dr. Enrique Gómez Treviño y al Dr. Benjamín Barón Sevilla, por formar parte de mi comité y contribuir con sus asertivas observaciones en las mejoras al desarrollo de este trabajo.

A los investigadores que me compartieron sus conocimientos en clases: Dr. Antonio Vidal, Dr. Alejandro Nava, Dra. Margarita López, Dr. Carlos Flores, Dr. Raúl Castro, Dr. Juan García, Dr. Lenin Ávila, Dr. Efraín Gómez, Dr. Marco Flores, Dr. Enrique Treviño, Dr. Francisco Esparza.

A los Proyectos de CeMIEGeo: (apoyo SENER/CONACYT 207032, 2013-01) por el apoyo económico para la campaña de obtención de datos en Acozulco, Puebla.

Al Centro de Sismología y Volcanología de Occidente SisVOc, por facilitarnos los vehículos para el trabajo de campo.

A Ricardo Carpio, Jaime Calderón, Olaf Cortés, Víctor Hugo Márquez y Adán Gómez, por su ayuda en la obtención de datos MT en campo.

A Miguel Oliver, Jonathan Carrillo, Jessica Salas, por las enseñanzas para el procesamiento e inversión de datos MT. Así como a Patricia Andrade, Esteban Tiznado y Martín Pacheco, por su apoyo para el manejo de GIS.

Al Coordinador del Posgrado Dr. Juan García Abdeslem, por orientarme oportunamente siempre con cordialidad y camaradería.

A la Lic. Ana Rosa Soto Rincón por brindarme desde mi primer día en CICESE apoyo, consejo y confianza. Por los "raites", los cafecitos, pero sobre todo por su sincera amistad.

A Cécica Cuevas, Bárbara Uribe, Olympia Caudillo, Enid Morán y Magda Chávez; por la inigualable ayuda en los diversos trámites administrativos.

A Lili Núñez, Lupita Morales, Blanquita Muñoz y al resto del personal de biblioteca, por su trato siempre amable y su oportuna orientación.

A Humberto Benítez y José Mojarro, por su trato siempre ameno y por ayudarme a mantener siempre funcionando al cien por ciento mi equipo de cómputo.

Al Contador Alfredo Azpilcueta, por su amistad, apoyo y confianza a prueba del tiempo y la distancia.

A la Maestra Alejandra por estar siempre pendiente del avance de este proyecto y brindarme siempre oportunas palabras de ánimo en cada llamada o mensaje.

A la Señorita Avellaneda por su talento compartido en cada canción que alegró mis caminos y mis horas de trabajo.

A los amigos de antaño, que me guiaron hacia y en el CICESE: Angélica Mota, Adrián Teutle, Armando Moctezuma, Olaf Arroyo, Ana Paula Hernández y José Serrano.

A mis amigos en Puebla: Francisco Arenas, Armado Ramos y Oscar Ojeda; por su incondicional camaradería y su peculiar sentido del humor.

A Marianggy, Armando, Yunhuen, Ana Bravo, Mayra, Estrella de Isis, Leydi, Karina, Diego, Esteban, Omar, Manuel; por los excelentes momentos que he compartido con ustedes. A Valeria, Thalia, Radha, Eliana, Yadira, Mariana, Stephany, Beatriz, Eleyra, Aideliz, Magia, Halia, Luis, Leandro, Saúl, Iván, Josué, Gerardo, Fernando, Juventino, Oswaldo, Cristian y Armando; por su gran compañerismo y amistad. Y a todos los demás compañeros de CICESE a quienes recordaré siempre con gratitud y cariño.

A la Bella cenicienta del Pacífico: Ensenada, Baja California. Por brindarme tranquilidad cada día con el runrún de sus olas y la belleza de sus atardeceres sobre el mar.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xiv
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Contexto geológico.....	2
1.2.1. Caldera Tulancingo-Acocolco.....	2
1.2.2. Columna litológica pozo EAC-1.....	4
1.2.3. Columna litológica Pozo EAC-2.....	8
1.3. Estudios térmicos y geofísicos previos en la Caldera Acocolco.....	11
1.3.1. Estudios de modelado térmico.....	11
1.3.2. Estudios geofísicos.....	12
Capítulo 2 Bases del método de volúmenes finitos y del método magnetotelúrico	
2.1. Método de volúmenes finitos.....	16
2.2. Método magnetotelúrico.....	19
2.2.1. Fundamentos electromagnéticos del método magnetotelúrico.....	20
Capítulo 3. Metodología	
3.1 Modelo térmico.....	26
3.1.1 Parámetros de los modelos térmicos para los pozos EAC-1 y EAC-2.....	28
3.2 Modelo de conductividad eléctrica.....	33
3.2.1. Campaña para obtención de datos.....	33
3.2.2. Equipo de Medición.....	35
3.2.3. Implementación del equipo en campo y registro de datos.....	35
3.2.4. Procesamiento de series de tiempo.....	38
3.2.5. Inversión de datos.....	39
3.2.6. Inversión tipo Occam 1D.....	39

Capítulo 4. Resultados y Discusión	
4.1 Resultados.....	42
4.1.1. Modelos térmicos.....	42
4.1.1.1 Base de datos.....	42
4.1.1.2 Perfiles de temperaturas.....	42
4.1.2 Modelos de conductividad eléctrica.....	55
4.1.2.1 Curvas de resistividad y fase.....	55
4.1.2.2 Inversión 1D.....	56
4.2 .Discusión.....	56
4.2.1 Comparación de resultados de los modelos térmicos y los modelos de resistividad eléctrica.....	60
4.2.1.1 Comparación de resultados en el pozo EAC-1.....	64
4.2.1.2 Comparación de resultados en el pozo EAC-2.....	65
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	70
Literatura citada.....	72
Anexos	
Anexo A. Tabla de propiedades termofísicas de las unidades litológicas.....	75
Anexo B Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados en los modelos térmicos.....	81

Lista de figuras

Figura		Página
1	Mapa geológico del complejo Tulancingo-Acoaculco ubicado al oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT). Se muestra la ubicación de la zona de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2; dos de las principales zonas de manifestaciones y alteración hidrotermal; así como algunas fallas inferidas (tomado de Canet <i>et al.</i> , 2015).....	3
2	Mapa esquemático del complejo de caldera Tulancingo-Acoaculco, muestra la ubicación de las localidades, manantiales, pozos de exploración EAC-1, EAC-2 y sistemas de fallas (modificado de Peiffer <i>et al.</i> , 2014).....	4
3	Columna litológica del pozo de exploración EAC-1 (modificado de Peiffer <i>et al.</i> , 2014)	6
4	Registros de temperaturas medidos en reposo durante la perforación del pozo EAC-1 a 6 horas (T-10 línea amarilla), 12 horas (T-11a línea azul), 12 horas (T-11b línea negra), 18 horas (T-12a línea café) y 18 horas (T-12b línea verde), los registros T-14 (línea roja) y T-15 (línea naranja) corresponden a temperaturas del pozo en calentamiento a 312 horas (posiblemente después de terminado el pozo); se indican también las zonas de cambio de pendiente asociadas a una zona de convección (tomado de Lorenzo-Pulido <i>et al.</i> , 2010).....	7
5	Columna litológica del pozo EAC-2 (tomado de Lorenzo-Pulido <i>et al.</i> , 2010).....	9
6	Registros de temperaturas medidos después de terminado el pozo EAC-2 a 6 horas (T-9 línea verde), 12 horas (T-10 línea amarilla), 18 horas (T-11 línea naranja) y 24 horas (T-12 línea roja), se indican también las zonas de cambio de pendiente (tomado de Pulido <i>et al.</i> , 2010).....	10
7	Perfiles de profundidad-temperatura para el pozo exploratorio EAC-1. Los perfiles mostrados a la izquierda corresponden a las temperaturas de homogenización de las inclusiones fluidas (T_H) y las temperaturas de registro medidas al finalizar el pozo (reportados por López-Hernández <i>et al.</i> , 2009). A la derecha se muestran los perfiles de temperatura simulados, considerando un perfil inicial que está dado por las inclusiones fluidas, el perfil de referencia corresponde al del registro de la temperatura en pozo. El mejor modelo de ajuste, de acuerdo con la simulación numérica, corresponde al modelo de 7000 años (tomado de Canet <i>et al.</i> , 2015).....	11
8	Lineamientos interpretados a partir de la gravimetría de la zona Tulancingo-Tlaxco. Las líneas curvas blancas al centro indican la traza de las calderas y las líneas rectas blancas los lineamientos interpretados a partir de la presencia de gradientes abruptos (tomado de López-Hernández, 2009).....	13
9	Lineamientos interpretados a partir de la magnetometría de la zona Tulancingo-Tlaxco. Las líneas curvas blancas al centro indican la traza de las calderas y las líneas rectas blancas los lineamientos interpretados a partir de la presencia de gradientes abruptos (tomado de López-Hernández, 2009).....	13

10	Inversión de datos MT realizada por Arango-Galván <i>et al.</i> , (2013), utilizando las polarizaciones TE y TM, más el Tipper. Señalan 6 unidades geoelectricas de las cuales tres de ellas son conductoras (UC1, UC2 y UC3) y las otras tres resistivas (UR1, UR2 y UR3).....	15
11	Distribución de volúmenes de control, fronteras y puntos nodales en un dominio unidimensional para la difusión en estado estacionario (modificado de Versteeg y Malalasekera, 2007).....	16
12	Notación utilizada en un dominio unidimensional para la difusión en estado estacionario (tomado de Versteeg y Malalasekera, 2007).....	17
13	Registros de los perfiles de temperaturas correspondientes a los pozos EAC-1 y EAC-2, los marcadores azules señalan las temperaturas medidas en los pozos.....	26
14	Equipo de trabajo para campaña de registro de datos MT.....	33
15	Distribución de las estaciones MT (señaladas en círculos blancos) en la zona de estudio, así como la ubicación de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 (indicados por los círculos ámbar).....	34
16	Equipo de registro magnetotelúrico: a) Consola de registro ADU-07e. b) Electrodo EFP-06. c) Bobinas de inducción MFS-06e (imágenes tomadas de las fichas técnicas de Metronix).....	35
17	Esquema de un arreglo típico de consola de registro, sensores eléctricos y magnéticos en un sitio de mediciones de datos MT (tomado de ficha técnica de Metronix).....	36
18	a) Instalación de electrodo en campo antes de ser cubierto totalmente. b) Bobina de inducción para medir la componente H_z del campo magnético enterrada verticalmente. c) Conexiones mediante cableado especial de los electrodos y bobinas a la consola de registro. d) Arreglo en campo de un punto de medición, las líneas rojas indican las orientaciones NS y EW sobre las cuales se ubicarán los electrodos, en el cruce de las líneas se observa la consola de registro y los rectángulos sombreados en azul señalan la colocación de las bobinas de inducción.....	37
19	Ejemplo de la selección de los segmentos en la serie de tiempo que serán eliminadas del procesamiento por presentar ruido o estar fuera del rango de medición.....	38
20	Ejemplo de las curvas de resistividad aparente y fase obtenida para el sitio MT-01.....	39
21	Modelos térmicos para el pozo EAC-1 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 600°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (21a) y K2 (21b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (21c) y K4 (21d) respectivamente. En la Figura 21a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación, y en la Figura 21b la leyenda muestra la litología del pozo.....	47

- 22 Modelos térmicos para el pozo EAC-1 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 650°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (22a) y K2 (22b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (22c) y K4 (22d) respectivamente. En la Figura 22a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (22a-d) y en la Figura 22b la leyenda muestra la litología..... 48
- 23 Modelos térmicos para el pozo EAC-1 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 700°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (23a) y K2 (23b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (23c) y K4 (23d) respectivamente. En la figura 23a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (23a-d) y en la Figura 23b la leyenda muestra la litología..... 49
- 24 Modelos térmicos para el pozo EAC-1 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 750°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (24a) y K2 (24b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (24c) y K4 (24d) respectivamente. En la figura 24a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (24a-d) y en la Figura 24b la leyenda muestra la litología..... 50
- 25 Modelos térmicos para el pozo EAC-2 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 600°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (25a) y K2 (25b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (25c) y K4 (25d) respectivamente. En la figura 25a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (25a-d) y en la Figura 25b la leyenda muestra la litología..... 51
- 26 Modelos térmicos para el pozo EAC-2 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 650°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (26a) y K2 (26b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (26c) y K4 (26d) respectivamente. En la figura 26a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (26a-d) y en la Figura 26b la leyenda muestra la litología..... 52

27	Modelos térmicos para el pozo EAC-2 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 700°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (27a) y K2 (27b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (27c) y K4 (27d) respectivamente. En la figura 27a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (27a-d) y en la Figura 27b la leyenda muestra la litología.....	53
28	Modelos térmicos para el pozo EAC-2 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 750°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (28a) y K2 (28b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (28c) y K4 (28d) respectivamente. En la figura 28a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (28a-d) y en la Figura 28b la leyenda muestra la litología.....	54
29	a) y b) Curva de resistividad aparente contra periodo obtenidas a partir del determinante del tensor de impedancia para los sitios MT-01 y MT-02. c) y d) Curva de fase contra periodo de los sitios MT-01 y MT-02.....	55
30	a) Curvas de resistividad aparente contra periodo de los sitios MT-01 (marcadores en azul) y MT-02 (marcadores en rojo) obtenidas a partir del determinante del tensor de impedancia. b) Curva de fase contra periodo de los sitios MT-01 (marcadores en azul) y MT-02 (marcadores en rojo).....	56
31	Modelo de inversión aplicando el algoritmo de Occam 1D en el sitio MT-01. a) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de resistividad aparente observados. b) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de fase observados. c) Modelo obtenido de resistividad contra profundidad que describe el comportamiento de la resistividad en el subsuelo.....	57
32	Modelo de inversión aplicando el algoritmo de Occam 1D en el sitio MT-02. a) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de resistividad aparente observados. b) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de fase observados. c) Modelo obtenido de resistividad contra profundidad que describe el comportamiento de la resistividad en el subsuelo.....	57
33	Modelo de inversión aplicando el algoritmo de Occam 1D en sitio MT-01 considerando solamente datos con frecuencias entre 1000 Hz y 0.3430 Hz. a) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de resistividad aparente seleccionados. b) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de fase seleccionados. c) Modelo obtenido de resistividad contra profundidad que describe el comportamiento de la resistividad en el subsuelo.....	58
34	Modelo de inversión aplicando el algoritmo de Occam 1D en sitio MT-02 considerando solamente datos con frecuencias entre 1000 Hz y 0.3430 Hz. a) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de resistividad aparente seleccionados. b) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de fase seleccionados. c) Modelo obtenido de resistividad contra profundidad que describe el comportamiento de la resistividad en el subsuelo.....	59

35	Modelos térmicos obtenidos para cada pozo con el mejor ajuste entre las temperaturas modeladas (marcadores rojos) y los datos registrados en los pozos (marcadores azules), las líneas horizontales magenta señalan los cambios en la litología.....	60
36	Modelo térmico EAC-1 T650K1 con el valor de la conductividad térmica asignada a cada unidad litológica.....	61
37	Curva de resistividad vs profundidad obtenida con la inversión Occam 1D para el sitio MT-01.....	62
38	Conjunto de estimaciones promedio utilizando resistividades aparentes obtenidas con la metodología de Gómez-Treviño (1996), para el sitio MT-01.....	63
39	Conjunto de estimaciones promedio utilizando resistividades aparentes con distintas separaciones obtenidas con la metodología de Gómez-Treviño (1996) y comparadas con el modelo de inversión tipo Occam para el sitio MT01. Con el círculo rojo se indica el descenso en la resistividad en ambos métodos.....	63
40	Modelo térmico EAC-1 T650K1 comparado con el comportamiento del valor de la conductividad eléctrica obtenida con la inversión tipo Occam 1D de los datos del sitio MT-01.....	64
41	Comportamiento de los valores de la conductividad térmica propuestos para el modelo EAC1 T650K1 comparado con el comportamiento del valor de la conductividad eléctrica obtenida con la inversión tipo Occam 1D para los datos del sitio MT-01.....	65
42	Modelo térmico EAC2 T750K4 comparado con el comportamiento del valor de la conductividad térmica asignada a cada unidad litológica.....	66
43	Curva de resistividad vs profundidad obtenida con la inversión Occam 1D para el sitio MT-02.....	67
44	Conjunto de estimaciones promedio utilizando resistividades aparentes con la metodología de Gómez-Treviño (1996), para el sitio MT-02.....	67
45	Conjunto de promedios de resistividades obtenidos con la metodología de Gómez-Treviño (1996) y comparadas con el modelo de inversión tipo Occam para el sitio MT-02. El óvalo señala la zona en la cual las resistividades promedio no presentan un comportamiento consistente con la inversión de Occam.....	68
46	Modelo térmico EAC2 T750K4 comparado con el comportamiento del valor de la conductividad eléctrica obtenida con la inversión tipo Occam 1D de los datos del sitio MT-02.....	69
47	Comportamiento de los valores de la conductividad térmica propuestos para el modelo EAC2 T750K4 comparado con el comportamiento del valor de la conductividad eléctrica obtenida de la inversión tipo Occam 1D para los datos del sitio MT-02.....	69

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Descripción simplificada de la litología del pozo EAC-1.....	5
2	Unidades litológicas y descripción petrográfica simplificada del pozo EAC-2 (tomado de Viggiano-Guerra <i>et al.</i> , 2011).....	8
3	Propiedades físicas y condiciones iniciales y de frontera utilizadas para construir los modelos térmicos del pozo EAC-1.....	28
4	Propiedades físicas y condiciones iniciales y de frontera utilizadas para construir los modelos térmicos del pozo EAC-2.....	31
5	Coordenadas de la ubicación de las estaciones MT-01 y MT-02.....	34
6	Grupos de valores de conductividades térmicas utilizadas en los modelos correspondientes al pozo EAC-1.....	42
7	Grupos de valores de conductividades térmicas utilizadas en los modelos correspondientes al pozo EAC-2.....	43
8	Valores absolutos de los errores normalizados para las temperaturas simuladas en el pozo EAC-1 para cada grupo de conductividades térmicas comparadas con las temperaturas registradas en pozo.....	44
9	Valores absolutos de los errores normalizados para las temperaturas simuladas en el pozo EAC-2 con cada grupo de conductividades térmicas comparadas con las temperaturas registradas en pozo.....	45
10	Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados y su ajuste promedio en porcentaje, obtenidos para cada modelo térmico de acuerdo a la temperatura propuesta en la base y al grupo de conductividades térmicas asociado a la litología de cada pozo.....	46

Capítulo 1. Introducción

El presente trabajo de investigación compara los modelos del subsuelo obtenidos al analizar el comportamiento de los campos de temperaturas y las conductividades eléctricas de la zona geotérmica de Acoculco, en el sector de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 ubicados dentro del complejo volcánico de la caldera Tulancingo-Acoculco.

La zona de estudio se encuentra en la región centro oriente del país, a 130 km al NE de la ciudad de México, dentro del área correspondiente a la caldera de Acoculco cercana a los límites de los Estados de Hidalgo y Puebla. Esta zona ha sido reconocida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como un sistema geotérmico de roca seca caliente (Hot Dry Rock -HDR- por sus siglas en inglés) y es un candidato potencial para el desarrollo de un sistema geotérmico mejorado (Enhanced Geothermal System -EGS- por sus siglas en inglés). Conocer el comportamiento del campo de temperaturas así como las propiedades eléctricas del subsuelo en este sistema geotérmico, proporciona información útil durante la etapa de exploración y evaluación del potencial geotérmico en este tipo de yacimientos no convencionales.

Los modelos del campo de temperaturas se obtuvieron utilizando un código numérico escrito en Fortran que resuelve la ecuación diferencial de conducción de calor de Fourier en estado transitorio en una dimensión (1D), utilizando el método de volúmenes de control; las condiciones iniciales y de frontera utilizadas para la modelación se establecieron con base en la información de los perfiles de temperaturas y las columnas litológicas obtenidas de los pozos EAC-1 y EAC-2 publicados por Lorenzo-Pulido *et al.*, (2010) y Canet *et al.*, (2015). A la par se realizó el procesamiento y análisis de los datos magnetotelúricos (MT) medidos y registrados para este trabajo en las ubicaciones de los pozos antes mencionados. En el caso electromagnético se aplicó el método de inversión de Occam (Constable *et al.*, 1987) y se obtuvieron modelos 1D de las conductividades eléctricas del subsuelo.

1.1 Objetivo

El objetivo general de esta tesis es realizar un estudio comparativo del comportamiento de los datos de la conductividad térmica y la conductividad eléctrica a partir de un modelado térmico puramente conductivo y un modelado de conductividad eléctrica, ambos en 1D. Los modelos se obtuvieron a partir de los datos litológicos y termo-físicos reportados en la literatura, así como del procesamiento de datos MT medidos y registrados en los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2, ubicados en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla.

Los objetivos particulares fueron: 1) Revisar el estado de arte en trabajos relacionados con: estudios de modelado térmico en campos geotérmicos en México, estudios de HDR en México y el mundo, estudios

de exploración térmica y geofísica (método MT) en la caldera de Acoculco. 2) Crear una base de datos de las propiedades termo-físicas que corresponden a las unidades litológicas incluidas en las columnas litológicas reportadas de ambos pozos exploratorios. 3) Evaluar el campo de temperaturas en los pozos exploratorios e inferir áreas en el subsuelo con potencial geotérmico de HDR (a partir de los perfiles de temperatura simulados). 4) Estimar la distribución de la conductividad eléctrica del subsuelo en la zona de los pozos EAC-1 y EAC-2, mediante mediciones de datos MT 5) Analizar los resultados para inferir las condiciones físicas del posible sistema geotérmico.

1.2 Contexto geológico

1.2.1 Caldera Tulancingo-Acoculco

Tulancingo-Acoculco es un complejo volcánico del Plioceno-Cuaternario, caracterizado por dos estructuras de colapso tipo caldera y constituido principalmente por la acumulación de derrames de lava, domos y productos piroclásticos, que incluyen ignimbritas, y depósitos de oleadas y de caída (López-Hernández, 2009). El sistema geotérmico de Acoculco está alojado en el complejo de caldera volcánica que se extiende sobre los límites de los Estados de Hidalgo y Puebla, en la porción oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) (Figura1). El origen del vulcanismo en esta parte del CVT es atribuido a la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa Norteamericana (Nixon, 1982) junto con una fuerte contribución del manto litosférico (S P Verma, 2000, 2001). En una escala menor, la caldera Acoculco se encuentra dentro de la más grande y antigua caldera Tulancingo-Acoculco. A menudo se hace referencia a ambas calderas como el complejo caldérico Tulancingo-Acoculco (Peiffer *et al.*, 2014).

Tres principales periodos de vulcanismo han sido identificados dentro del área. El primer periodo (3.0-2.7 Ma) está relacionado a la actividad y el colapso de la caldera de mayor tamaño, la de Tulancingo de 32 km de diámetro. La caldera Acoculco con un diámetro de 18 km se asocia a un segundo episodio de vulcanismo más joven (1.7-0.24 Ma) ocurrido dentro de la caldera Tulancingo. Un tercer episodio (1.8-0.2 Ma) generó vulcanismo monogenético sin eventos de caldera (López-Hernández *et al.*, 2009; Verma, 2001). Estudios más recientes definen con mayor precisión un episodio de reactivación hace 1.2 Ma (Macías, 2017).

Hay dos sistemas principales de fallas normales regionales cruzando el complejo caldérico Tulancingo-Acoculco, identificados por diversos estudios geofísicos, como: gravimetría, magnetometría, resistividad eléctrica y magnetotelúricos (López-Hernández *et al.*, 2009). El sistema Apan-Piedras-Encimadas con orientación NE-SW y el sistema Tulancingo-Tlaxco con orientación NW-SE (Figura 2); estos sistemas de fallas probablemente actuaron como guías para los magmas ascendentes (Peiffer *et al.*, 2014).

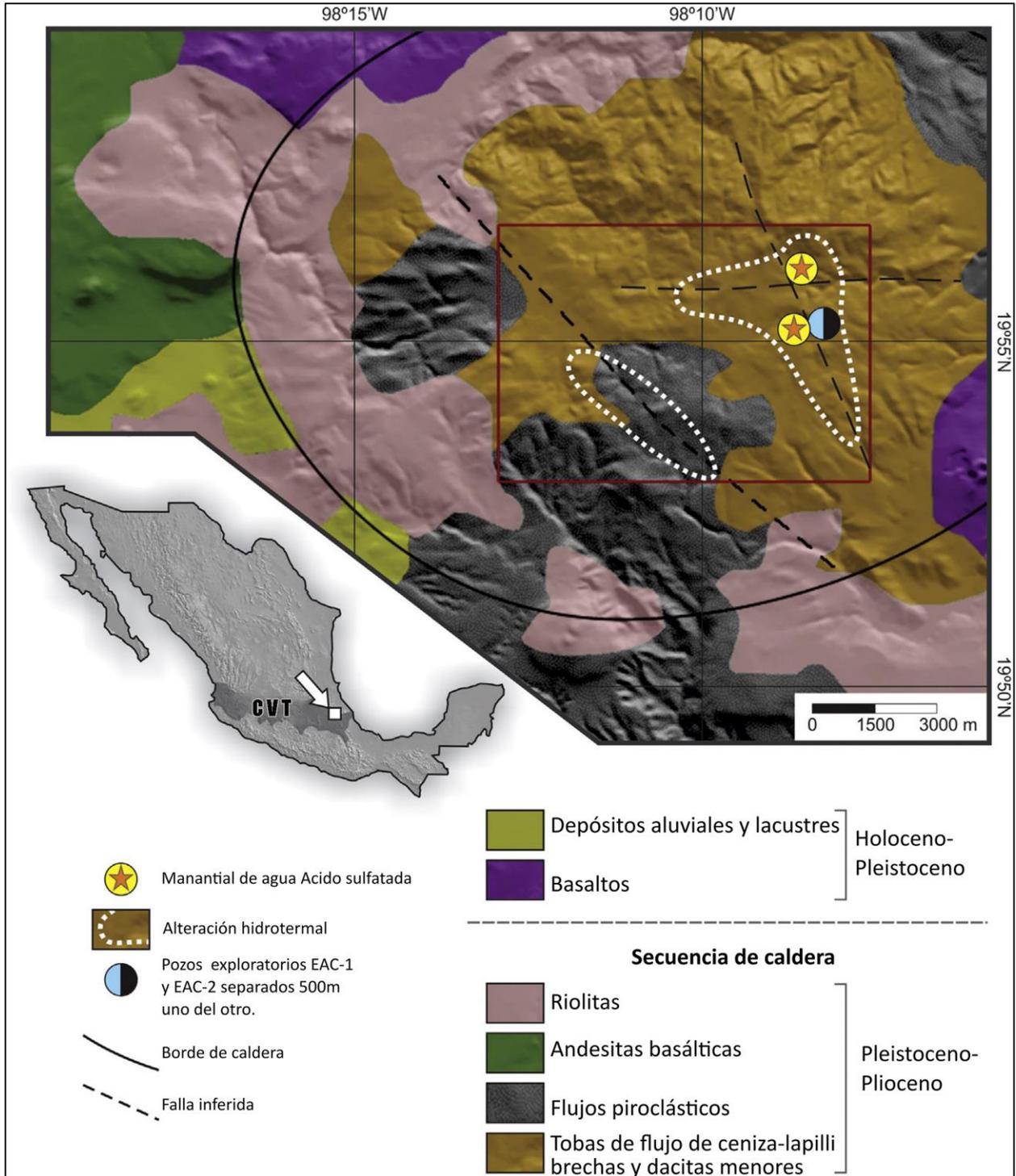


Figura 1. Mapa geológico del complejo Tulancingo-Aocolco ubicado al oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT). Se muestra la ubicación de la zona de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2; dos de las principales zonas de manifestaciones y alteración hidrotermal; así como algunas fallas inferidas (tomado de Canet *et al.*, 2015).

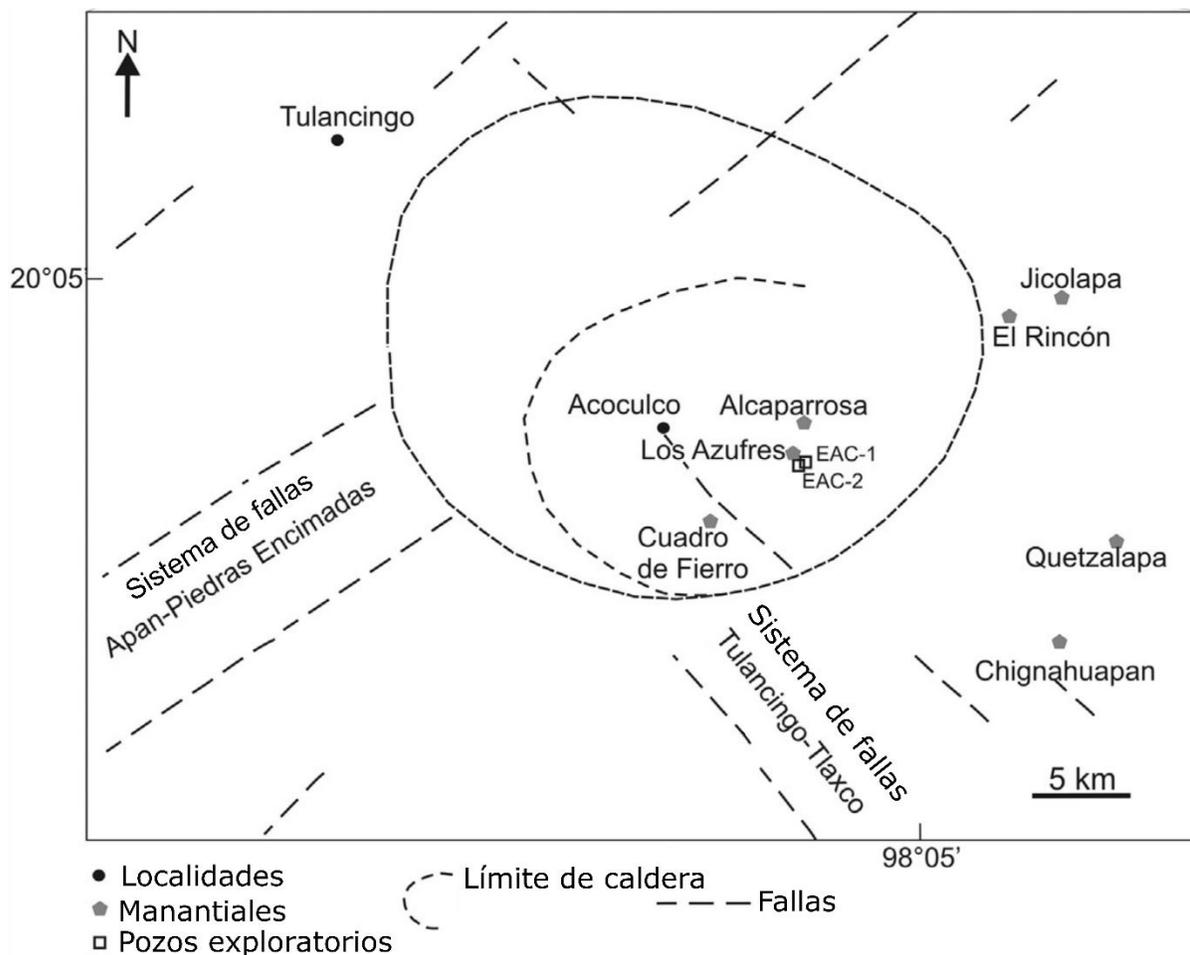


Figura 2. Mapa esquemático del complejo de caldera Tulancingo-Acocolco, muestra la ubicación de las localidades, manantiales, pozos de exploración EAC-1, EAC-2 y sistemas de fallas (modificado de Peiffer *et al.*, 2014).

1.2.2 Columna litológica pozo EAC-1

El pozo vertical EAC-1 fue perforado en 1995 hasta una profundidad total de 2000 m. Su objetivo fue verificar la presencia de altas temperaturas a profundidad y estudiar las condiciones de permeabilidad en el subsuelo. Este pozo profundo fue ubicado cerca de una zona de emisión de gases, cercana al manantial denominado Los Azufres. Los resultados de la perforación proporcionaron evidencia sólida de la existencia de una zona de altas temperaturas que se asocia con la actividad post-caldera más reciente (López-Hernández y Castillo-Hernández, 1997).

López-Hernández (2009) identifica y describe tres unidades principales en la columna litológica del pozo EAC-1 (ver Tabla 1), la Figura 3 muestra su columna litológica.

Tabla 1. Descripción simplificada de la litología del pozo EAC-1.

Profundidad (m)	Descripción petrográfica simplificada	Observaciones
0-790	Esta unidad está formada, desde la base hacia la cima, por la riodacita Las Minas, la ignimbrita Los Azufres, la dacita Cruz Colorada y la ignimbrita Acozulco.	Esta secuencia volcánica cubre el intervalo Plioceno-Cuaternario.
790-1660	Secuencia de rocas metamórficas compuesta principalmente de skarn y dos zonas delgadas de mármol, una de ellas en contacto con un cuerpo intrusivo.	Esta secuencia es parte de los sedimentos cretácicos de la Sierra Madre Oriental localmente metamorfoseados.
1660-2000	Granito de hornblenda.	Es la unidad más profunda penetrada por el pozo.

Esta autora señala además que durante la perforación se midieron series de registros de temperatura y presión, y que los perfiles de temperatura mostraron un incremento constante con la profundidad con un gradiente de 11°C/100 m, valor que corresponde a más de tres veces el gradiente normal en el cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) reportado por Ziagos *et al.*, (1985). Menciona también que en el último registro de temperaturas (tomado 288 horas después de haberse detenido la perforación durante la etapa de evaluación), se observó un gradiente constante de 13.8°C/100 m con una temperatura máxima de 307°C medida en el fondo del pozo, por lo cual consideró que los resultados indicaban la existencia de un régimen de transferencia de calor conductivo de alta temperatura (Figura 4) con baja permeabilidad, provocada por el depósito de minerales secundarios que provocaron el auto sellamiento del sistema.

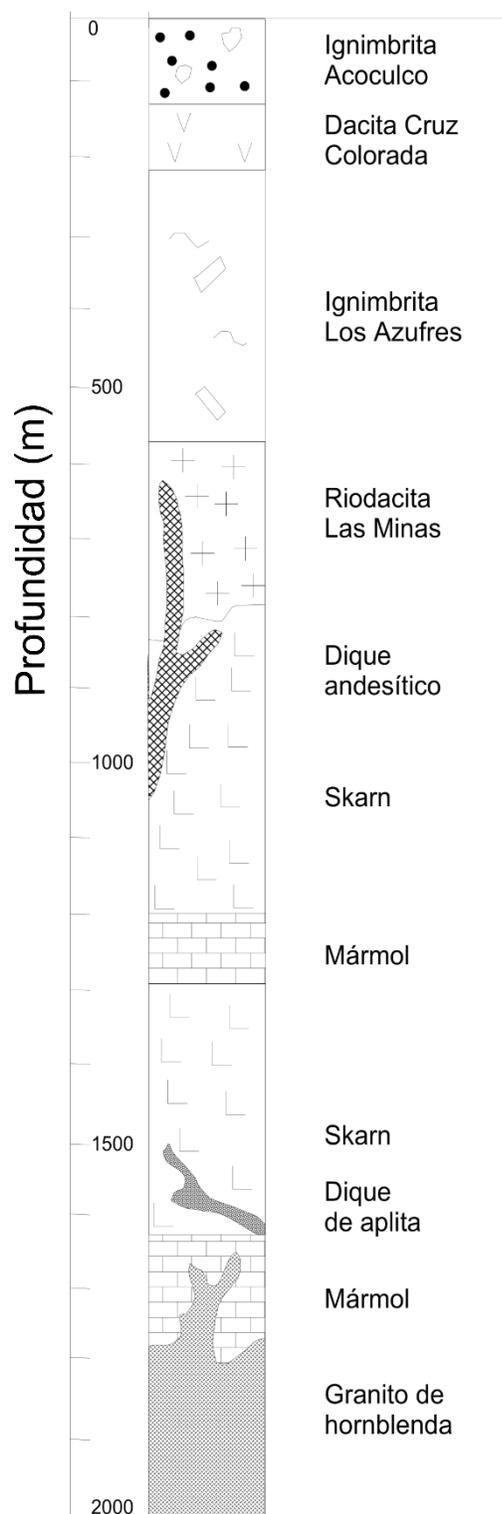


Figura 3. Columna litológica del pozo de exploración EAC-1 (modificado de Peiffer *et al.*, 2014).

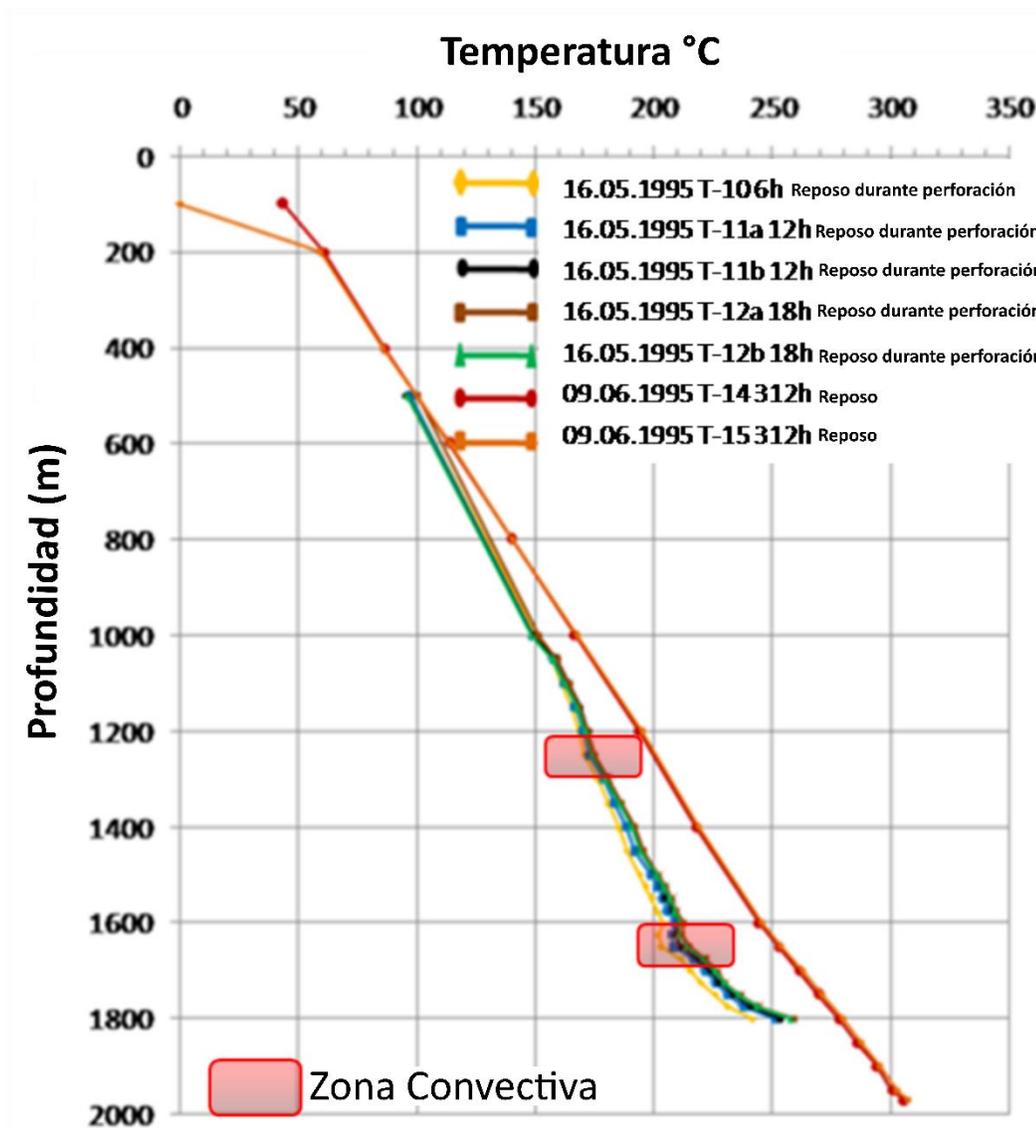


Figura 4. Registros de temperaturas medidos en reposo durante la perforación del pozo EAC-1 a 6 horas (T-10 línea amarilla), 12 horas (T-11a línea azul), 12 horas (T-11b línea negra), 18 horas (T-12a línea café) y 18 horas (T-12b línea verde), los registros T-14 (línea roja) y T-15 (línea naranja) corresponden a temperaturas del pozo en calentamiento a 312 horas (posiblemente después de terminado el pozo); se indican también las zonas de cambio de pendiente asociadas a una zona de convección (tomado de Lorenzo-Pulido *et al.*, 2010).

1.2.3 Columna litológica Pozo EAC-2

El pozo exploratorio EAC-2 fue perforado en el año 2008, ubicado a unos 500 m al NE del pozo EAC-1, se perforó a 1900 m de profundidad. Las unidades litológicas son descritas petrográficamente de una manera simplificada por Viggiano-Guerra *et al.*, (2011), como se muestra en la Tabla 2. La Figura 5 muestra la columna litológica del pozo EAC-2.

Tabla 2. Unidades litológicas y descripción petrográfica simplificada del pozo EAC-2 (tomado de Viggiano-Guerra *et al.*, 2011).

Profundidad (m)	Descripción petrográfica simplificada	Observaciones
2-340	Ignimbritas, dacitas y andesitas de rasgos primarios relictos por exceso de alteración.	Vulcanismo terciario-cuaternario e hidrotermalismo reciente.
350-450	Calizas lutítico-limolíticas metamorfoseadas y alteradas.	Borde del cuerpo metamórfico de contacto cretácico sin intrusiones diaquísticas salvo en la parte superior.
450-1580	Hornfels de calcita-wollastonita-granate y diópsida intrusionado por cuerpos cuarzo-monzoníticos y micrograníticos.	Metamorfismo de calizas silíceas del Cretácico producido por el intrusivo subyacente y por abundantes cuerpos diasquísticos cuarzo-monzoníticos y por microgranitos.
1580-1900	Granito de hornblenda intrusionando a las calizas. Contiene fragmentos de hornfels derivados de las calizas asimiladas	Granito post-cretácico o cretácico.

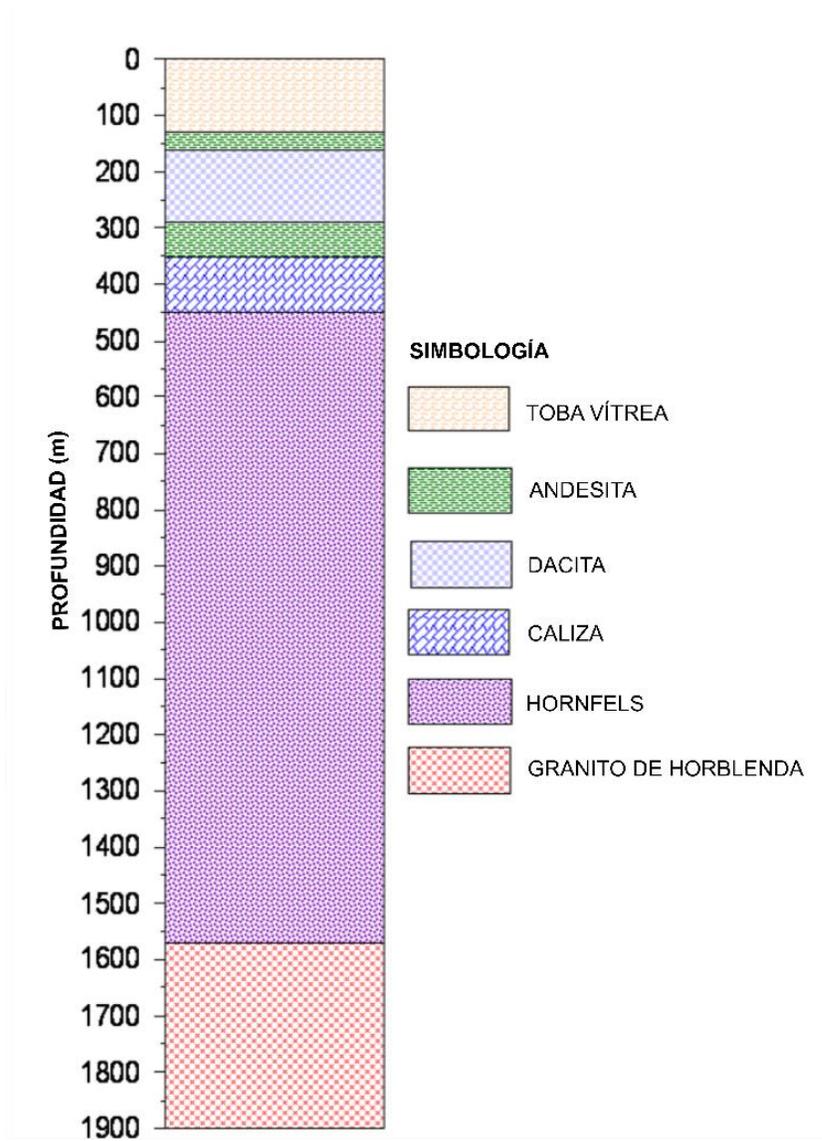


Figura 5. Columna litológica del pozo EAC-2 (tomado de Lorenzo-Pulido *et al.*, 2010).

Lorenzo-Pulido *et al.*, (2010) reportan una serie de cuatro registros de temperatura, tomados a 6, 12, 18 y 24 horas después de terminado el pozo, hasta una profundidad de 1900 m, en los que se observan zonas con cambio de pendiente a 1550 y 1850 m, en este pozo no hay registros de temperaturas en fase de calentamiento del pozo (Figura 6). Además señalan que con base en la información de ambos pozos puede considerarse que el basamento del área está constituido por calizas que han sufrido un metamorfismo de contacto debido al emplazamiento de un intrusivo (granito de hornblenda) dando origen a rocas metamórficas calcáreas (skarn y hornfels).

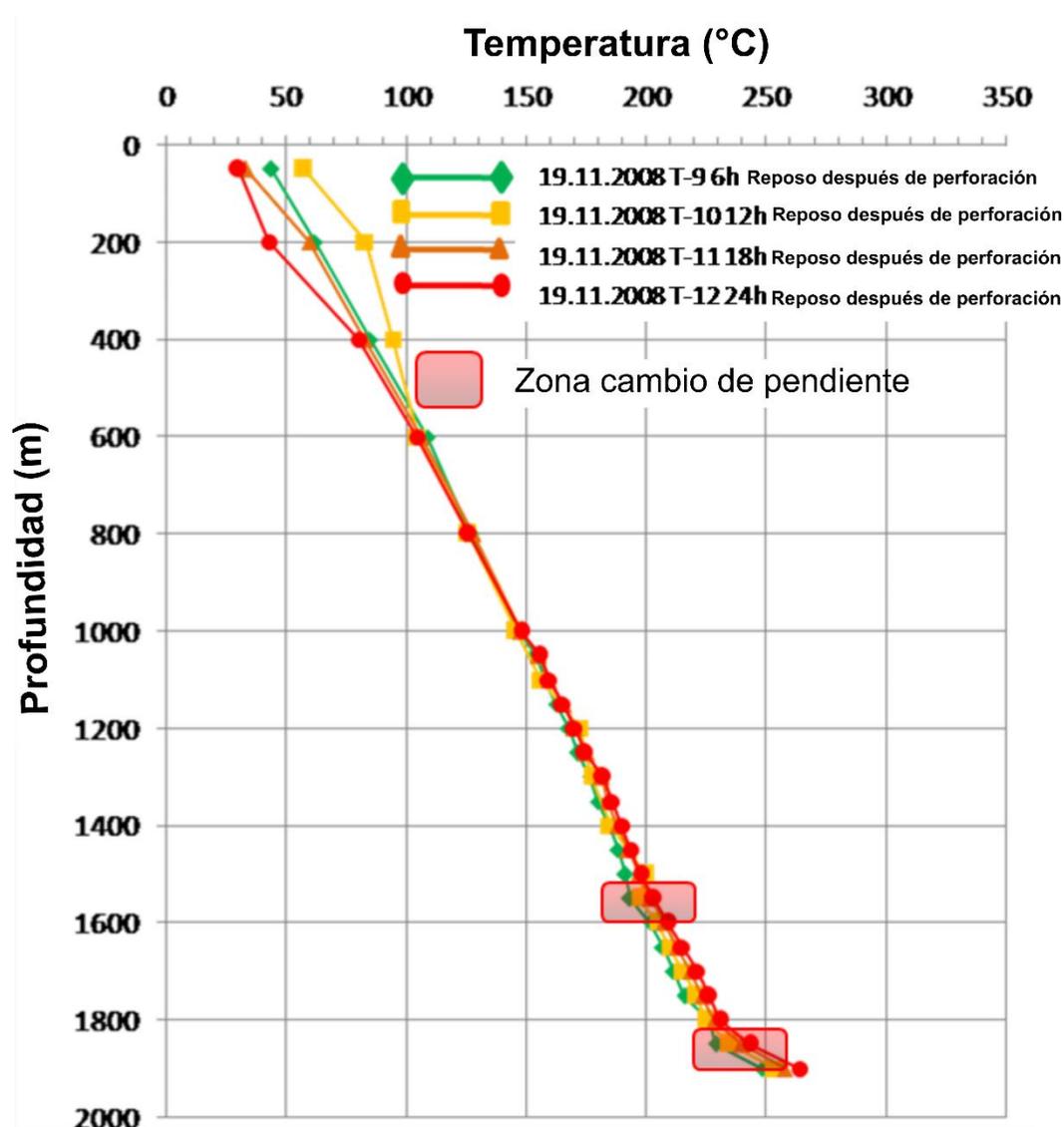


Figura 6. Registros de temperaturas medidos después de terminado el pozo EAC-2 a 6 horas (T-9 línea verde), 12 horas (T-10 línea amarilla), 18 horas (T-11 línea naranja) y 24 horas (T-12 línea roja), se indican también las zonas de cambio de pendiente (tomado de Pulido *et al.*, 2010).

1.3 Estudios térmicos y geofísicos previos en la Caldera Acoculco

1.3.1 Estudios de modelado térmico.

Canet *et al.*, (2015) a partir de la estimación de temperaturas de homogenización de inclusiones fluidas en muestras del pozo EAC-1, encontraron que en el pasado debió ocurrir un régimen convectivo en los primeros ~1400 m del sistema geotérmico. A partir de un régimen convectivo 1D representado por el perfil de temperaturas dadas por las inclusiones fluidas, estos autores estiman un tiempo de 7000 años para pasar al régimen conductivo actual (Figura 7). En su trabajo concluyen que la transición convección-conducción ocurrió en la parte superior del sistema geotérmico (~ 1400 m) y que fue causada por una disminución en la permeabilidad, posiblemente debida a la precipitación de minerales de alteración (auto-sellamiento), la cual provocó el cese de la transferencia de calor por convección para dar lugar al régimen conductivo presente hoy en día.

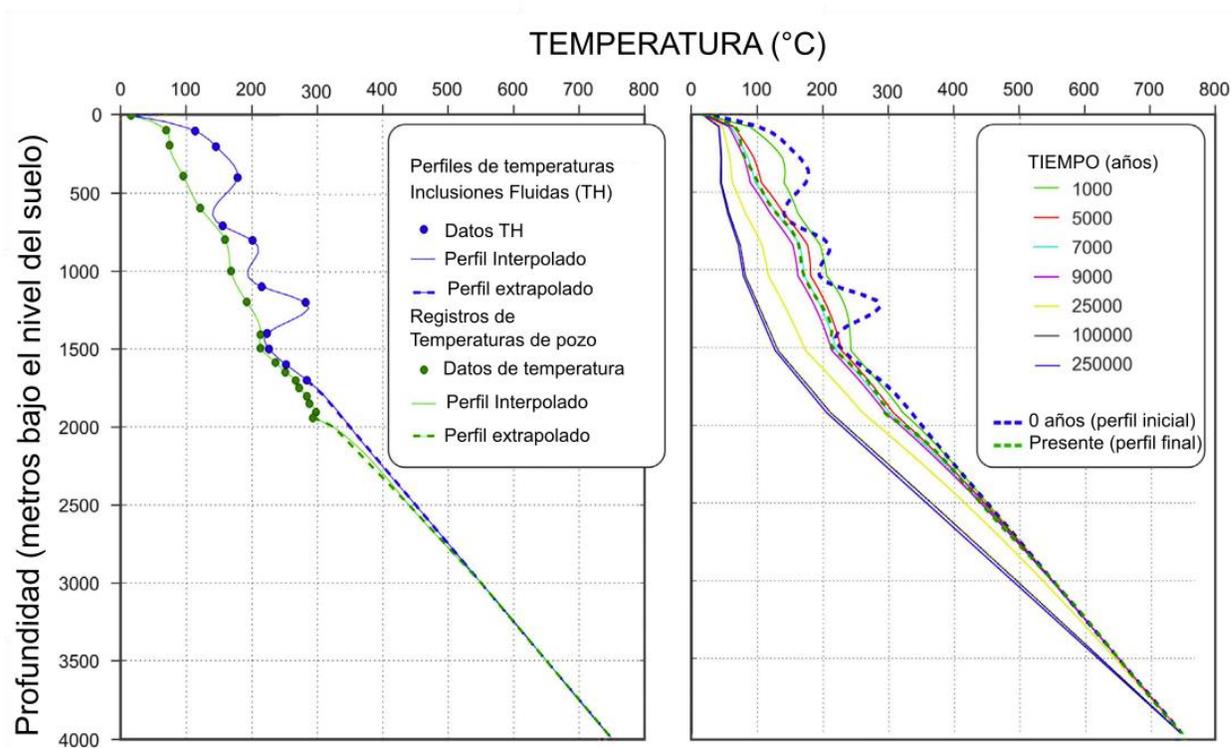


Figura 7. Perfiles de profundidad-temperatura para el pozo exploratorio EAC-1. Los perfiles mostrados a la izquierda corresponden a las temperaturas de homogenización de las inclusiones fluidas (T_H) y las temperaturas de registro medidas al finalizar el pozo (reportados por López-Hernández *et al.*, 2009). A la derecha se muestran los perfiles de temperatura simulados, considerando un perfil inicial que está dado por las inclusiones fluidas, el perfil de referencia corresponde al del registro de la temperatura en pozo. El mejor modelo de ajuste, de acuerdo con la simulación numérica, corresponde al modelo de 7000 años (tomado de Canet *et al.*, 2015).

1.3.2 Estudios geofísicos.

Los estudios de exploración geotérmica que incluyen reconocimientos preliminares de geología, geofísica y geoquímica de la zona geotérmica de Acozulco iniciaron en la década de los años 80 (Viggiano-Guerra *et al.*, 2011). En relación a los resultados de los estudios de exploración eléctrica y gravimétrica López-Hernández y Castillo-Hernandez (1997) señalan:

Los resultados del estudio geo eléctrico (SEV Schlumberger) con separaciones entre electrodos de corriente AB/2 mayores a 1000 m mostraron una anomalía extensa de baja resistividad cubriendo el área casi en su totalidad. Esta baja resistividad aparentemente es producida por una zona poco profunda de alteración argilítica. Los contornos de resistividad aparente, para una separación AB/2=750 m, se usaron para delinear zonas de máximo interés y para discriminar las zonas de alteración térmicamente inactivas.

En gravimetría, la anomalía de Bouguer mostró contornos con orientaciones NW-SE, y altos gradientes NE-SW disminuyendo hacia el SW. Éstos están relacionados con el engrosamiento de los depósitos volcánicos del Cenozoico en esa dirección, con características de baja densidad. No se observaron mínimos gravimétricos asociados con un colapso de caldera. En la derivada horizontal de la anomalía de Bouguer las anomalías de altos gravimétricos más extendidas tienen orientación NW-SE, las zonas de máximos gradientes pueden relacionarse con las principales fallas enterradas por depósitos recientes (Figura 8).

Los resultados del estudio magnético presentados por López-Hernández *et al.*, (2009), señalan que la Caldera Acozulco coincide con un máximo magnético subcircular. La fuente de esta anomalía fue modelada como un cuerpo intrusivo con una susceptibilidad magnética de 9.39×10^{-3} S.I. Las anomalías de alta densidad y alta susceptibilidad magnética pueden representar un conducto asociado a magmatismo máfico post caldera Acozulco-Tulancingo. Una segunda anomalía magnética ocurre cerca de las manifestaciones geotermales El Rincón y coincide con el conducto de ignimbritas Piedras Encimadas que se encuentra sobre la estructura circular de la caldera. Estos dos máximos son conductos que podrían formar parte del sistema de tendencia NE de centros volcánicos emplazados a lo largo del lineamiento Apan-Piedras Encimadas (Figura 9).

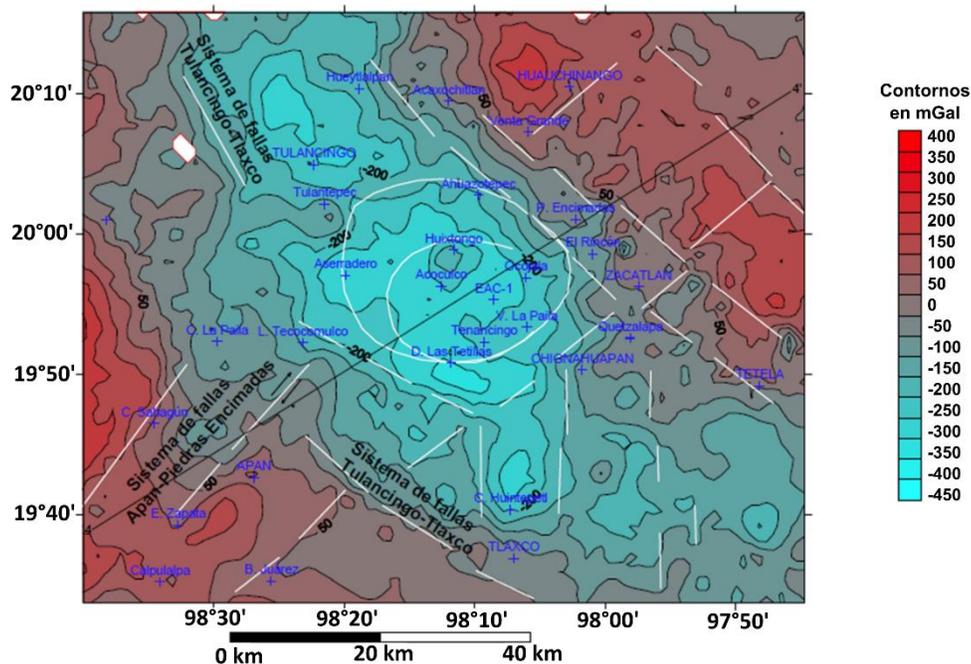


Figura 8. Lineamientos interpretados a partir de la gravimetría de la zona Tulancingo-Tlaxco. Las líneas curvas blancas al centro indican la traza de las calderas y las líneas rectas blancas los lineamientos interpretados a partir de la presencia de gradientes abruptos (tomado de López-Hernández, 2009).

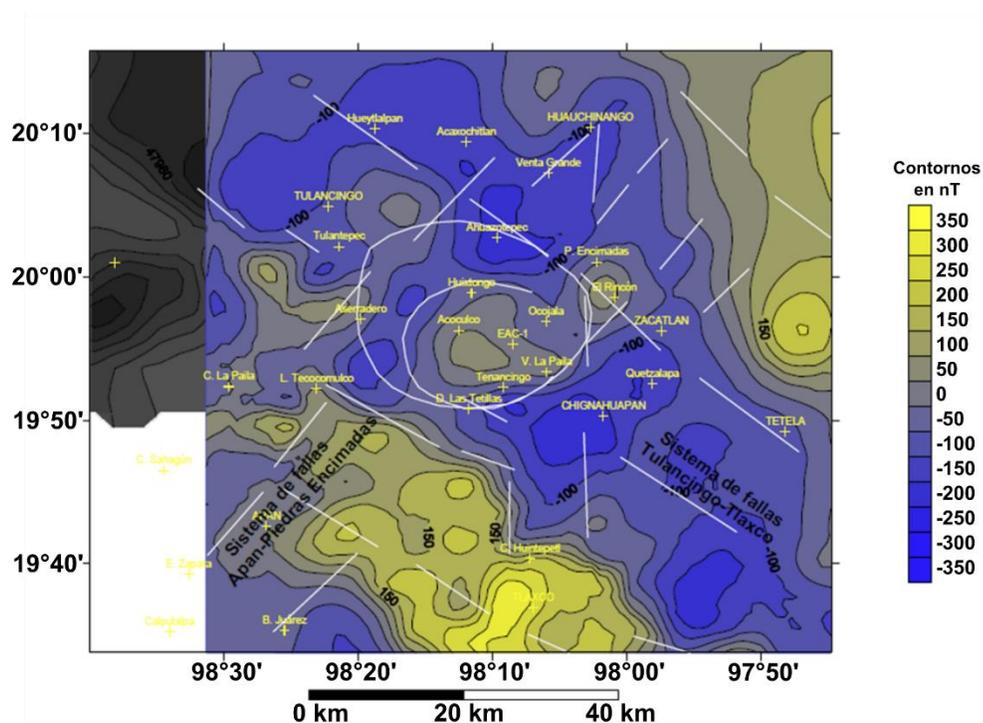


Figura 9. Lineamientos interpretados a partir de la magnetimetría de la zona Tulancingo-Tlaxco. Las líneas curvas blancas al centro indican la traza de las calderas y las líneas rectas blancas los lineamientos interpretados a partir de la presencia de gradientes abruptos (tomado de López-Hernández, 2009).

De acuerdo con los estudios de López-Hernández (2009), el levantamiento de datos MT (realizado por el departamento de exploración de la CFE) en la caldera Acozulco, consistió de 63 sondeos en un área de 2200 km² y se realizó para estudiar la estructura eléctrica del sistema geotérmico de Acozulco a una gran profundidad, estos datos fueron interpretados usando inversión de Bostick (1977) en el modo Transversal Eléctrico (TE), los cuales permitieron crear un mapa de resistividades sub-superficiales a profundidades mayores de 1000 m. Los resultados indican que el área geotermal está localizada en una zona de relativamente alta resistividad, con valores por encima de los 100 Ω m en el área cercana al estanque de Los Azufres. Debe mencionarse que esta interpretación debe ser tomada con suma cautela ya que la mencionada transformación de Bostick solo es aplicable en medios unidimensionales, en todo caso es recomendable aplicarla al determinante del tensor y no a alguno de los modos de polarización, como se hizo en este caso. En ocasiones puede ser usada como una herramienta preliminar para obtener modelos iniciales antes de utilizar inversiones más adecuadas a la complejidad del área de estudio (2D o 3D).

En un trabajo independiente y usando también datos MT, Arango-Galván *et al.*, (2013) identifican una unidad conductiva sin continuidad lateral probablemente asociada a la presencia de alteración argílica; subyaciendo este horizonte detectan también una unidad de resistividad intermedia con valores menores a 300 Ω m y los relacionan con la secuencia volcánica asociada con la actividad del complejo Tulancingo-Acozulco; observan además una capa de resistividades mayores a los 500 Ω m, posiblemente correlacionada con la roca metamórfica correspondiente al skarn o mármol, así como a intrusivos de tipo andesítico y riódacítico (Figura 10).

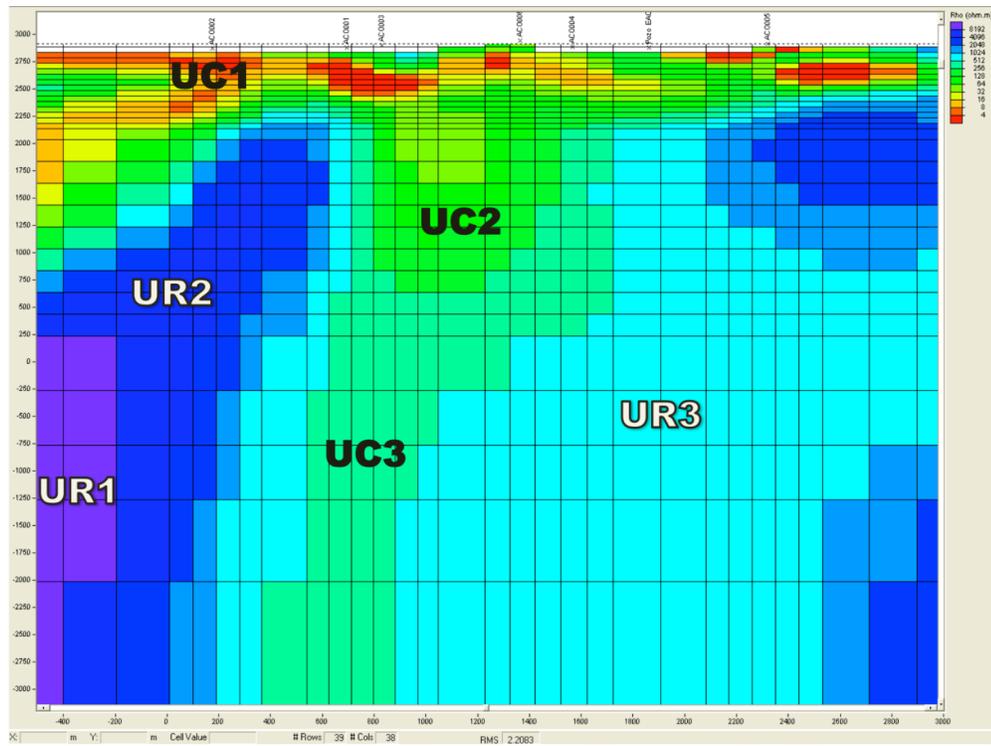


Figura 10. Inversión de datos MT realizada por Arango-Galván *et al.*, (2013), utilizando las polarizaciones TE y TM, más el Tipper. Señalan 6 unidades geoelectricas de las cuales tres de ellas son conductoras (UC1, UC2 y UC3) y las otras tres resistivas (UR1, UR2 y UR3)

Capítulo 2. Bases del método de volúmenes finitos y del método magnetotelélico.

2.1 Método de volúmenes finitos.

El método de volúmenes finitos (MVF) o de volúmenes de control (VC) es una técnica numérica que transforma ecuaciones diferenciales parciales aplicadas sobre volúmenes diferenciales, en ecuaciones algebraicas discretas aplicadas sobre volúmenes finitos (Moukalled *et al.*, 2015). Este método puede ser aplicado fácilmente para determinar campos de temperatura en sólidos de forma regular o irregular y en sólidos cuyas propiedades térmicas (como densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica) pueden ser variables (Cebula y Taler, 2014).

De acuerdo con Versteeg y Malalasekera (2007), se ilustra a continuación el MVF usado para describir la conducción (difusión) en estado estacionario en una dimensión.

Considerando la conducción en estado estacionario de una propiedad ϕ en un dominio unidimensional definido como se observa en la Figura 11.

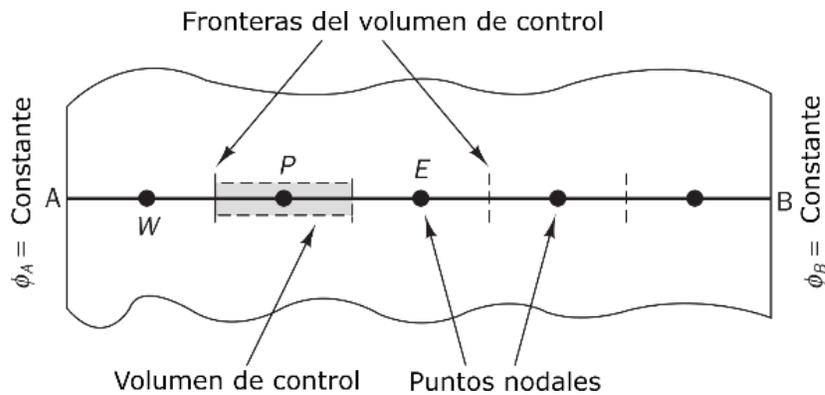


Figura 11. Distribución de volúmenes de control, fronteras y puntos nodales en un dominio unidimensional para la difusión en estado estacionario (modificado de Versteeg y Malalasekera 2007).

A manera de ejemplificar, se muestra el proceso de difusión térmica en estado estacionario, el cual se rige por la ecuación:

$$\frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) + S = 0 \quad (1)$$

donde ϕ es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Γ es la conductividad térmica (W/mK) y S es el término fuente o sumidero. Los valores de frontera de ϕ en los puntos A y B son constantes y están preestablecidos a partir de condiciones de frontera de tipo Neumann (temperatura o gradiente de temperatura), Dirichlet (flujo de calor) o una función establecida.

El primer paso en el MVF es dividir el dominio en volúmenes de control discretos. Se coloca un determinado número de puntos nodales en el espacio contenido entre A y B. Las fronteras (o caras) de los volúmenes de control se posicionan en el punto medio entre nodos adyacentes, así cada nodo queda rodeado por un volumen de control o celda (Figura 11). Si identificamos en una geometría unidimensional un punto nodal P cualquiera junto con sus puntos vecinos, los nodos de oeste a este, estarán indicados por W y E respectivamente. Para referirse a la cara del lado oeste del volumen de control se usará w , y para la cara del lado este se hará con e (para problemas convectivos las caras w y e representan el campo de velocidades). La distancia entre los nodos W y P , y entre los nodos P y E , son identificadas por δx_{WP} y δx_{PE} respectivamente. De manera similar las distancias entre la cara w y el punto P , y entre P y la cara e están denotadas por δx_{wP} y δx_{Pe} respectivamente. En la Figura 12 observamos también que el ancho del volumen de control es $\Delta x = \delta x_{we}$.

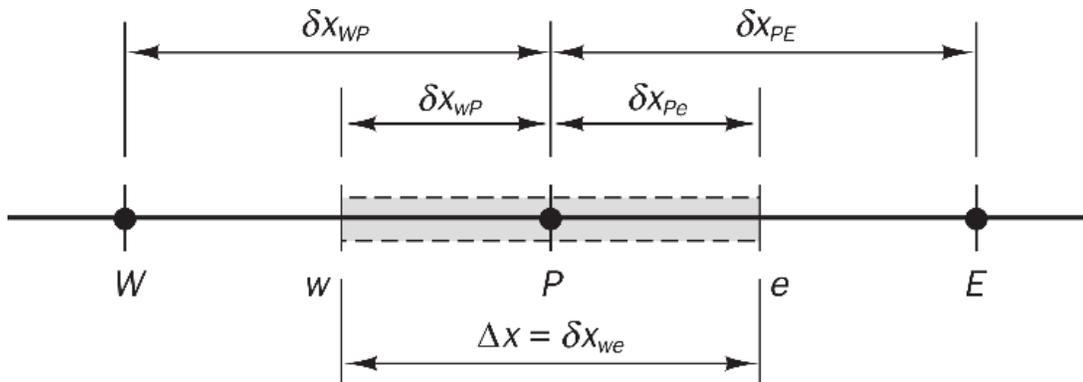


Figura 12. Notación utilizada en un dominio unidimensional para la difusión en estado estacionario (tomado de Versteeg y Malalasekera 2007).

El segundo paso, que es la clave del MVF, es la discretización y consiste en la integración de la ecuación gobernante sobre un volumen de control para obtener una ecuación discretizada en su punto nodal P . Para el control de volumen definido en la ecuación (1) obtenemos:

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) dV + \int_{\Delta V} S dV = \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (2)$$

Aquí A es el área transversal de la cara del volumen de control, ΔV es el volumen y \bar{S} es el valor promedio de la fuente S sobre el volumen de control. Una característica muy atractiva del MVF es que la ecuación discretizada tiene una clara interpretación física. La ecuación (2) establece que el flujo difusivo de ϕ que está dejando la cara este (E), menos el flujo difusivo de ϕ que está entrando a la cara oeste (W) es igual a la generación de ϕ , es decir, que ésta constituye una ecuación equilibrada para ϕ sobre el volumen de control.

Siguiendo una práctica bien establecida, los valores de la propiedad ϕ (en las fronteras) y Γ (en los puntos nodales) deben estar definidos. Para estimar perfiles de temperatura en las caras del volumen de control (y por lo tanto el flujo difusivo), se usa una distribución aproximada de las propiedades Γ entre los puntos nodales. Las aproximaciones lineales son el modo más obvio y simple de calcular los valores de interface y los gradientes. Esta práctica se llama esquema de diferenciación central (una mejor aproximación corresponde a la media armónica). En una cuadrícula uniforme interpolada linealmente, los valores para Γ_w y Γ_e están dados por:

$$\Gamma_w = \frac{\Gamma_w + \Gamma_p}{2} \quad (3)$$

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_p + \Gamma_e}{2} \quad (4)$$

y los términos de flujo difusivo se evalúan como:

$$\left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e = \Gamma_e A_e \left(\frac{\phi_e - \phi_p}{\delta x_{pe}} \right) \quad (5)$$

$$\left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w = \Gamma_w A_w \left(\frac{\phi_p - \phi_w}{\delta x_{pw}} \right) \quad (6)$$

En situaciones prácticas, el término fuente S puede ser una función de la variable dependiente. En esos casos el MVF se aproxima al término fuente por medio de una forma lineal:

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_p \phi_p \quad (7)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5), (6) y (7) en la ecuación (2) tenemos:

$$\Gamma_e A_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) - \Gamma_w A_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) + (S_u + S_p \phi_P) = 0 \quad (8)$$

Esta ecuación puede ser reordenada como:

$$\left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e + \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w - S_p \right) \phi_P = \left(\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w \right) \phi_W + \left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e \right) \phi_E + S_u \quad (9)$$

Si identificamos los coeficientes de ϕ_W y ϕ_E del lado derecho de la ecuación (9) como a_W y a_E , y el coeficiente de ϕ_P del lado izquierdo como a_P , la ecuación anterior puede escribirse como:

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + S_u \quad (10)$$

donde:

a_W	a_E	a_P
$\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w$	$\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e$	$a_W + a_E - S_p$

Los valores de S_u y S_p se pueden obtener del modelo de la fuente en la ecuación $\bar{\Delta}V = S_u + S_p \phi_P$. Las ecuaciones (10) y (7) representan la forma discretizada de la ecuación

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi = 0 \quad (11)$$

Este tipo de ecuación discretizada es central para todos los desarrollos posteriores.

Las ecuaciones discretizadas de la forma de la ecuación (11) se deben configurar en cada uno de los puntos nodales con el fin de resolver un problema. Para volúmenes de control que son adyacentes a las fronteras del dominio la ecuación general discretizada (11) es modificada para incorporar condiciones de frontera. El sistema de ecuaciones lineales algebraicas resultante se soluciona para obtener la distribución de la propiedad ϕ en los puntos nodales.

2.2 Método magnetoteléurico.

El método magnetoteléurico (MT) es una técnica electromagnética pasiva que consiste en medir simultáneamente, para una serie de frecuencias diferentes y en direcciones horizontales ortogonales sobre un punto en la superficie de la Tierra, las variaciones temporales naturales de los campos eléctrico y magnético, con la finalidad de conocer la conductividad eléctrica de las rocas en el interior de la Tierra (Chave y Jones, 2012). Las bases del método fueron establecidas en los trabajos de Tikhonov (1950) y Cagniard (1953).

El método MT utiliza el campo electromagnético inducido en la Tierra de forma natural, en una banda de periodos entre $\approx 10^{-2}$ a $\approx 10^3$ segundos. Para frecuencias menores a 1 Hz, el campo electromagnético natural se debe a la interacción de la magnetósfera y la ionósfera con el viento solar, lo cual provoca variaciones del campo magnético. Las frecuencias mayores a 1Hz se producen principalmente por rayos y tormentas eléctricas que ocurren alrededor del globo y cuya energía se transmite a través de la cavidad formada entre la ionósfera y la superficie terrestre.

2.2.1 Fundamentos electromagnéticos del método magnetotelúrico

Las ecuaciones de Maxwell describen matemáticamente el comportamiento de los campos electromagnéticos y se expresan de la siguiente manera:

Ley de Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (12)$$

Ley de Ampère-Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (13)$$

Ley de Gauss para el campo magnético:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (14)$$

Ley de Gauss para el campo eléctrico:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (15)$$

Donde \mathbf{E} representa al campo eléctrico (V/m), \mathbf{B} la inducción magnética (T), \mathbf{H} la intensidad del campo magnético (A/m), \mathbf{D} al desplazamiento eléctrico (C/m²), \mathbf{J} la densidad de corriente debida a cargas libres (A/m²), q la densidad de cargas libres (C/m³) y t al tiempo (s).

Además se cumplen las siguientes relaciones constitutivas:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (16)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (17)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (18)$$

donde σ , ε , y μ describen las propiedades intrínsecas de los materiales a través de los cuales se propagan los campos electromagnéticos. σ representa la conductividad eléctrica (S/m), esta propiedad indica la capacidad del material para permitir el transporte de una carga eléctrica. El recíproco de la conductividad eléctrica $\rho = 1/\sigma$ se conoce como resistividad eléctrica (Ωm). ε señala la permitividad

dieléctrica (F/m) y tiene un valor aproximado a $8.85 \times 10^{-12} F/m$. μ indica la permeabilidad magnética (H/m), si no hay materiales o rocas con gran contenido de magnetita la permeabilidad magnética se considera igual a la del espacio libre $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$.

Considerando (16), (17) y (18); las ecuaciones (12) y (13) pueden expresarse:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (19)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (20)$$

Aplicando el rotacional a las ecuaciones (19) y (20) obtenemos:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (21)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\sigma (\nabla \times \mathbf{E}) - \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (22)$$

Considerando como sinusoidales las variaciones de tiempo tenemos que:

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t} \quad (23)$$

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}_0 e^{i\omega t} \quad (24)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = i\omega \mathbf{E} \quad (25)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = i\omega \mathbf{H} \quad (26)$$

Siendo $\omega = 2\pi f$ la frecuencia angular. Con base en lo anterior las ecuaciones (21) y (22) pueden quedar expresadas en el dominio de la frecuencia de la siguiente manera:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega \mu \sigma \mathbf{E} - \omega^2 \varepsilon \mu \mathbf{E} \quad (27)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = i\omega \mu \sigma \mathbf{H} - \omega^2 \varepsilon \mu \mathbf{H} \quad (28)$$

Estas últimas dos expresiones, son las ecuaciones electromagnéticas para la propagación de los vectores del campo eléctrico y magnético en un medio isotrópico y homogéneo.

Observamos que las ecuaciones (27) y (28) se pueden escribir también de la forma:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + (\mu \varepsilon \omega^2 - i\mu \sigma \omega) \mathbf{E} = 0 \quad (29)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + (\mu \varepsilon \omega^2 - i \mu \sigma \omega) \mathbf{H} = 0 \quad (30)$$

o bien

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \kappa^2 \mathbf{E} = 0 \quad (31)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \kappa^2 \mathbf{H} = 0 \quad (32)$$

en donde

$$\kappa = \sqrt{\mu \varepsilon \omega^2 - i \mu \sigma \omega} \quad (33)$$

κ representa la constante de propagación. A frecuencias menores que 10^5 Hz y considerando el rango de valores típicos de σ , μ y ε en las rocas de la corteza de la Tierra, resulta que:

$$\mu \varepsilon \omega^2 \ll \mu \sigma \omega \quad (34)$$

Por lo cual las ecuaciones (27) y (28) se pueden expresar del siguiente modo:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i \omega \mu \sigma \mathbf{E} \quad (35)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = i \omega \mu \sigma \mathbf{H} \quad (36)$$

o bien

$$\nabla^2 \mathbf{E} - i \omega \mu \sigma \mathbf{E} = 0 \quad (37)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - i \omega \mu \sigma \mathbf{H} = 0 \quad (38)$$

Esto nos indica que, en el subsuelo, la propagación de los campos electromagnéticos está gobernada por la ecuación de difusión.

Considerando la relación (34), la constante de difusión (33) queda reducida a

$$\kappa = \sqrt{-i \mu \sigma \omega} \quad (39)$$

la cual es una cantidad compleja de la forma $\kappa = \alpha - i \beta$ cuyas partes real e imaginaria son

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (40)$$

estas cantidades son conocidas como las constantes de fase (α) y de atenuación (β).

Una solución para las ecuaciones (37) y (38), considerando ondas planas uniformes es:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\kappa r - \omega t)} = \mathbf{E}_0 e^{i(\alpha - i\beta)r - \omega t} = \mathbf{E}_0 e^{\beta r} e^{i(\alpha r - \omega t)} \quad (41)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{i(\kappa r - \omega t)} = \mathbf{H}_0 e^{i(\alpha - i\beta)r - \omega t} = \mathbf{H}_0 e^{\beta r} e^{i(\alpha r - \omega t)} \quad (42)$$

se observa que la amplitud de la onda se atenúa dependiendo del valor de β mientras que α modifica la fase. Partiendo de las ecuaciones anteriores, se puede calcular la distancia δ (llamada penetración nominal o *skin depth*) a la cual la amplitud de la onda decrece en un factor de $e^{-1} \approx 37\%$. Es decir, cuando $e^{-\beta\delta} = e^{-1}$ se obtiene que

$$\delta = \frac{1}{\beta} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (43)$$

Con la consideración de que $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$ y $\omega = 2\pi f$ la ecuación (43) queda:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{1}{f\sigma}} = 503 \sqrt{\rho T} \quad (44)$$

Siendo f la frecuencia (Hz), σ la conductividad eléctrica ($\Omega^{-1}m^{-1}$), ρ la resistividad eléctrica (Ωm), T el periodo (s), y δ el skin depth (m).

La conductividad o la resistividad de un medio homogéneo, puede encontrarse a partir de la razón entre los campos eléctrico y magnético:

$$\frac{1}{\sigma} = \rho = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (45)$$

En un medio homogéneo la razón entre las amplitudes de \mathbf{E} y \mathbf{H} es inversamente proporcional a la conductividad del medio y su diferencia de fase se mantiene constante e igual a 45° .

En un medio heterogéneo la ecuación (45) se convierte en una resistividad "aparente", y la razón (E_y/H_x) se considera una impedancia de superficie (Z_{yx}). De acuerdo a Vozoff (1990), la resistividad aparente se puede expresar de las siguientes formas:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}|^2 \quad \text{ó} \quad \rho_a = \frac{0.2}{f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (46)$$

En la primera expresión las unidades están en el Sistema Internacional, mientras que la segunda expresión es utilizada cuando se usan unidades de campo mV/km para el campo eléctrico, nT para el magnético y Hz para la frecuencia.

Se define además la fase de la impedancia como:

$$\phi_{yx}(\omega) = \arctan \left| \frac{\text{Im}(Z_{yx})}{\text{Re}(Z_{yx})} \right| \quad (47)$$

En las expresiones (46) y (47), propuestas inicialmente por Tikhonov (1950) y Cagniard (1953), quienes consideraron solamente medios estratificados, la impedancia de superficie es una cantidad escalar y compleja.

Cantwell (1960) y Berdichevsky (1960) reemplazaron la impedancia escalar por la impedancia en forma tensorial

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (48)$$

para así considerar variaciones en el subsuelo tanto verticales como horizontales.

En el caso de un medio con cambios solamente verticales (1D) la impedancia tensorial se reduce a la ecuación escalar de Cagniard:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \quad Z_{xy} = -Z_{yx} \quad (49)$$

Es decir $|Z_{xy}| = |Z_{yx}|$, por lo que solo se necesita medir una de las componentes del campo eléctrico junto con su campo magnético perpendicular para poder determinar la impedancia y posteriormente la resistividad aparente.

Cuando el medio es bidimensional (2D), es decir con variaciones en un plano XZ, profundidad y en una dirección horizontal, la impedancia Z_{xy} es distinta que la Z_{yx} y el tensor de impedancia puede reducirse a un tensor antidiagonal como en la ecuación (49) con la condición adicional de que el plano XZ sea perpendicular a la estructura bidimensional.

En general las observaciones de campo están influenciadas por variaciones tridimensionales de la resistividad, por lo que el tensor es un tensor completo con cuatro elementos complejos distintos de cero. En algunos casos se justifica interpretar los datos observados, esencialmente tridimensionales, con simulaciones en 1D o en 2D. En este trabajo, por ejemplo, queremos estudiar las variaciones con la profundidad de la conductividad térmica y eléctrica en dos puntos específicos (EAC-1 y EAC-2), por lo que conviene hacerlo considerando solamente variaciones con la profundidad (1D).

Una de las mejores maneras de reducir el tensor de impedancia observado para ser interpretado en términos de modelos 1D, es tomar el determinante del tensor

$$Z_{\text{det}} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}} \quad (50)$$

El determinante del tensor tiene la propiedad de que es invariante ante la rotación, es decir, no depende de las coordenadas de medición. En este trabajo utilizamos este determinante, en función de la frecuencia, debido a que los datos observados serán interpretados en términos de un modelo de capas, en cada uno de los dos sitios de interés.

3. Metodología

3.1 Modelo térmico

Con el objetivo de reproducir, con el mejor ajuste posible, el comportamiento de los campos de temperaturas registrados en los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 reportados por Lorenzo-Pulido *et al.*, (2010), se construyeron modelos térmicos 1D, tomando en consideración las características termofísicas de las columnas litológicas reportadas en la literatura, así como los datos que se encuentran disponibles en los estudios que se han realizado en la zona.

En los registros de temperaturas reportados para los pozos EAC-1 y EAC-2 se observaron comportamientos constantes en los gradientes geotérmicos que sugieren un mecanismo de transferencia de calor de tipo conductivo, así como temperaturas máximas de 307°C y 263°C en el fondo de cada pozo, respectivamente, como se muestra en la Figura 13.

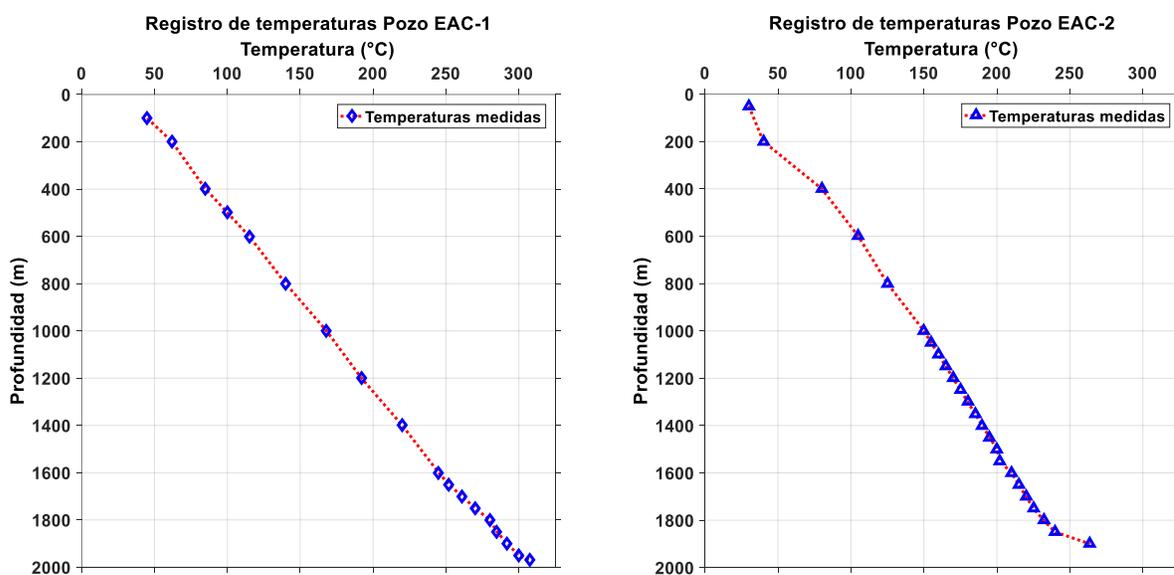


Figura 13. Registros de los perfiles de temperaturas correspondientes a los pozos EAC-1 y EAC-2, los marcadores azules señalan las temperaturas medidas en los pozos.

Para la obtención del campo de temperaturas se utilizó un código numérico escrito en lenguaje Fortran, que resuelve la ecuación diferencial de conducción de calor de Fourier en estado transitorio para 1D, haciendo uso del método de volúmenes de control (VC).

Considerando la ecuación:

$$(\rho C_p) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (51)$$

ρ representa la densidad $[kg/m^3]$, C_p la capacidad calorífica $[J/(kgK)]$ y k la conductividad térmica $[W/(mK)]$ de las unidades de roca presentes en la columna litológica.

$\partial T / \partial t$ Indica la derivada parcial de la temperatura T respecto al tiempo t .

∂x Significa la distancia entre dos nodos consecutivos del volumen de control.

A Es el área en la cara de contacto del volumen de control, que por ser caso 1D es igual a 1.

S Denota la presencia de fuente de calor o sumidero.

Se dividió el dominio en un número finito de volúmenes y se integró la ecuación (51) sobre cada uno de ellos para el intervalo de tiempo desde t hasta $t + \Delta t$, obteniendo la siguiente expresión:

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + S \quad (52)$$

Con los coeficientes $a_E = k_e / \delta x_e$ en el nodo este (E) y $a_W = k_w / \delta x_w$ en el nodo oeste (W) para cada volumen de control y con $a_p = (\rho C_p \Delta v) / \Delta t$, se escribe una ecuación con la forma de la ecuación (52) para cada nodo o volumen de control, modificando solamente aquellas que correspondan a nodos adyacentes a la frontera, en las cuales hay condiciones especiales. Al agrupar las ecuaciones para todos los nodos, llegamos al planteamiento de un sistema de ecuaciones lineal tridiagonal del tipo:

$$\begin{array}{cccccccccc} T_{P1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & = & S_1 \\ -a_{W2} T_{P1} & a_{P2} T_{P2} & -a_{E2} T_{P3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & = & S_2 \\ 0 & -a_{W3} T_{P2} & a_{P3} T_{P3} & -a_{E3} T_{P4} & 0 & 0 & 0 & 0 & = & S_3 \\ 0 & 0 & -a_{W4} T_{P3} & a_{P4} T_{P4} & -a_{E4} T_{P5} & 0 & 0 & 0 & = & S_4 \\ 0 & 0 & 0 & -a_{W5} T_{P4} & a_{P5} T_{P5} & -a_{E4} T_{P6} & 0 & 0 & = & S_5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & = & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{Wn} T_{Pn-1} & a_{Pn} T_{Pn} & -a_{En} T_{Pn+1} & = & S_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{Pn+1} & = & S_{n+1} \end{array} \quad (53)$$

Una forma de solucionar sistemas tridiagonales es utilizando el llamado algoritmo de Thomas o algoritmo de matriz tridiagonal (TDMA por sus siglas en inglés), suponiendo valores iniciales para T_i (que en el presente trabajo corresponde a un gradiente de temperatura), que nos permitan determinar los valores de los coeficientes; al resolver el problema lineal con coeficientes constantes y conocidos, se revisa el valor supuesto de los coeficientes obtenidos para volver a resolver un nuevo problema lineal con coeficientes corregidos. Tras sucesivas iteraciones, se llega a la convergencia de las soluciones del problema lineal (en el presente trabajo se utilizó un criterio de convergencia de error igual o menor a 1×10^{-6}).

3.1.1 Parámetros de los modelos térmicos para los pozos EAC-1 y EAC-2.

Para la elaboración de los modelos térmicos en ambos pozos se consideró un dominio unidimensional con una longitud vertical de 5000 metros, dividido en 200 volúmenes de control. El tiempo total de simulación se estableció en 250000 años dividido en intervalos de 50 años. Se consideró el tiempo de 250000 años para asociarlo al final de la actividad volcánica de Acoculco reportada por López-Hernández *et al.*, (2009) así como con la reactivación de la fractura anular mediante inyecciones de material magmático reportada por Lermo *et al.*, (2009). Además como condición de frontera se consideró una temperatura de 15°C para la superficie y se probaron cuatro valores de temperaturas en la base del modelo 600, 650, 700 y 750°C. Se realizó también una investigación bibliográfica para recopilar una base de datos con las propiedades termofísicas de rocas encontradas en los pozos de acuerdo a la litología reportada en la literatura. Las Tablas 3 y 4 señalan los valores de las propiedades físicas, así como las condiciones iniciales y de frontera utilizadas para construir los modelos térmicos de los pozos EAC-1 y EAC-2 respectivamente.

Tabla 3. Propiedades físicas y condiciones iniciales y de frontera utilizadas para construir los modelos térmicos del pozo EAC-1.

Propiedad físicas (unidades)	Valor
Condiciones iniciales y de frontera	
Longitud del dominio (m)	5000
Longitud de discretización Δz (m)	25
Total de volúmenes de control	200
Tiempo total de simulación (Ma.)	0.25
Tiempo de discretización Δt (años)	50
Temperatura en superficie ($^{\circ}C$)	15
Temperatura asumida en la base ($^{\circ}C$)	600, 650, 700, 750
Gradiente geotérmico ($^{\circ}C / km$)	33

Tabla 3 (continuación). Propiedades físicas y condiciones iniciales y de frontera utilizadas para construir los modelos térmicos de los pozos EAC-1.

Estratos geológicos (10 unidades de roca)		
Toba		
Espesor (<i>m</i>)		150
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)		1.40, 1.40, 1.40, 1.80
Calor específico (<i>J / kgK</i>)		840
Densidad (<i>kg / m³</i>)		2360
Dacita		
Espesor (<i>m</i>)		100
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)		1.87, 1.87, 2.00, 1.87
Calor específico (<i>J / kgK</i>)		840
Densidad (<i>kg / m³</i>)		2290
Ignimbrita		
Espesor (<i>m</i>)		50
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)		1.65, 1.65, 1.70, 1.65
Calor específico (<i>J / kgK</i>)		840
Densidad (<i>kg / m³</i>)		2341
Riodacita		
Espesor (<i>m</i>)		550
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)		2.08, 2.08, 2.20, 1.90
Calor específico (<i>J / kgK</i>)		900
Densidad (<i>kg / m³</i>)		2200
Skarn		
Espesor (<i>m</i>)		400
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)		1.60, 1.60, 1.80, 1.40
Calor específico (<i>J / kgK</i>)		920
Densidad (<i>kg / m³</i>)		2800
Mármol		
Espesor (<i>m</i>)		100
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)		2.80, 2.50 , 2.50, 2.50
Calor específico (<i>J / kgK</i>)		860

Tabla 3 (continuación). Propiedades físicas y condiciones iniciales y de frontera utilizadas para construir los modelos térmicos de los pozos EAC-1

Skarn	Densidad (kg / m^3)	2700
	Espesor (m)	250
	Conductividad térmica (W / mK)	1.60, 1.60, 1.60, 1.60
	Calor específico (J / kgK)	920
	Densidad (kg / m^3)	2800
Aplita	Espesor (m)	50
	Conductividad térmica (W / mK)	2.90, 2.00, 2.00, 2.00
	Calor específico (J / kgK)	790
	Densidad (kg / m^3)	2600
	Mármol	Espesor (m)
Conductividad térmica (W / mK)		2.80, 1.80, 1.80, 1.80
Calor específico (J / kgK)		860
Densidad (kg / m^3)		2700
Granito		Espesor (m)
	Conductividad térmica (W / mK)	2.68, 2.10, 2.10, 2.10
	Calor específico (J / kgK)	950
	Densidad (kg / m^3)	2761

Tabla 4. Propiedades físicas y condiciones iniciales y de frontera utilizadas para construir los modelos térmicos del pozo EAC-2.

Propiedad físicas (unidades)	Valor
Condiciones iniciales y de frontera	
Longitud del dominio (m)	5000
Longitud de discretización Δz (m)	25
Total de volúmenes de control	200
Tiempo total de simulación (Ma)	0.25
Tiempo de discretización Δt (años)	50
Temperatura en superficie ($^{\circ}C$)	15
Temperatura asumida en la base ($^{\circ}C$)	600, 650, 700, 750
Gradiente geotérmico ($^{\circ}C / km$)	33
Estratos geológicos (7 unidades de roca)	
Ignimbrita	
Espesor (m)	150
Conductividad térmica (W / mK)	1.65, 1.65, 1.65, 1.65
Calor específico (J / kgK)	840
Densidad (kg / m^3)	2341
Andesita	
Espesor (m)	50
Conductividad térmica (W / mK)	1.72, 1.72, 1.72, 1.72
Calor específico (J / kgK)	1151
Densidad (kg / m^3)	2180
Dacita	
Espesor (m)	150
Conductividad térmica (W / mK)	1.87, 1.87, 1.87, 1.87
Calor específico (J / kgK)	840
Densidad (kg / m^3)	2290

Tabla 4. (continuación). Propiedades físicas y condiciones iniciales y de frontera utilizadas para construir los modelos térmicos de los pozos EAC-2.

Andesita	
Espesor (<i>m</i>)	50
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)	1.72, 1.72, 1.72, 1.72
Calor específico (<i>J / kgK</i>)	1151
Densidad (<i>kg / m³</i>)	2180
Caliza	
Espesor (<i>m</i>)	100
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)	2.37, 2.37, 2.37, 2.60
Calor específico (<i>J / kgK</i>)	851
Densidad (<i>kg / m³</i>)	27714
Hornfels	
Espesor (<i>m</i>)	1100
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)	2.41, 2.41, 2.41, 3.00
Calor específico (<i>J / kgK</i>)	880
Densidad (<i>kg / m³</i>)	2740
Granito	
Espesor (<i>m</i>)	3400
Conductividad térmica (<i>W / mK</i>)	2.10, 2.00, 1.90, 2.20
Calor específico (<i>J / kgK</i>)	950
Densidad (<i>kg / m³</i>)	2761

3.2 Modelo de conductividad eléctrica

3.2.1 Campaña para obtención de datos.

Durante la segunda semana del mes de noviembre del año 2015, con el apoyo de personal técnico del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), así como del Centro de Sismología y Volcanología de Occidente (SisVOc), se realizó una campaña para obtener el registro de 10 sitios magnetotelúricos (MT) en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla (Figura 14). En este trabajo solamente interpretamos los datos observados en los sitios MT-01 y MT-02 correspondientes a la ubicación de los pozos EAC-1 y EAC-2, respectivamente.



Figura 14. Equipo de trabajo para campaña de registro de datos MT.

La posición de las estaciones se estableció con base a las condiciones del terreno, así como a la disposición de caminos de acceso, los sitios de observación se distribuyeron en dos perfiles, con direcciones SW-NE y SE-NW, la separación aproximada entre estaciones fue de 500 m. (Figura 15).

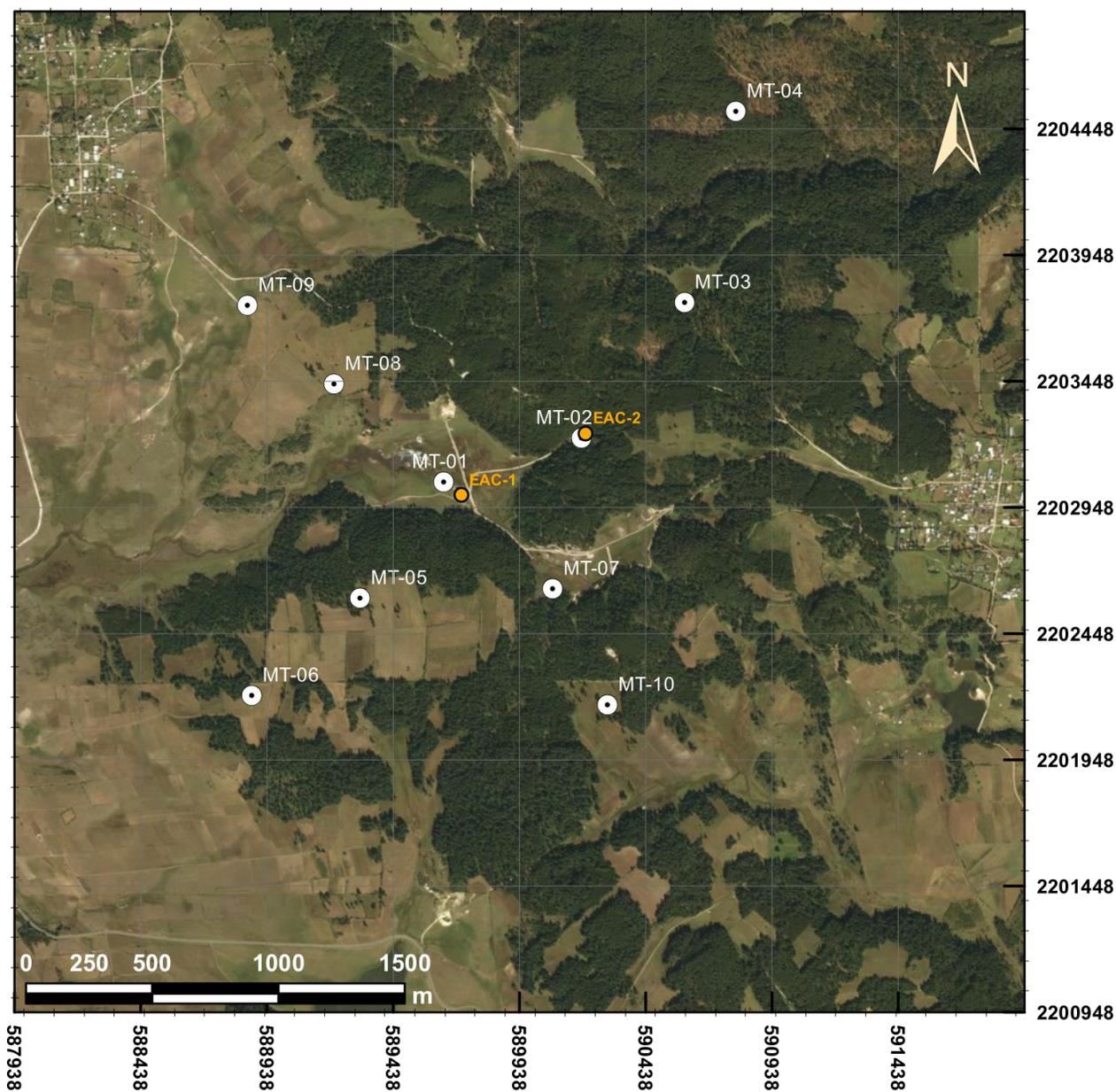


Figura 15. Distribución de las estaciones MT (señaladas en círculos blancos) en la zona de estudio, así como la ubicación de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 (indicados por los círculos ámbar).

Las coordenadas de la ubicación de las estaciones que se estudiaron en este trabajo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Coordenadas de la ubicación de las estaciones MT-01 y MT-02.

Estación	Latitud	Longitud	Coordenadas UTM	
MT-01	19° 55.303'N	98° 8.611'O	589638.65 E	2203047.1 N
MT-02	19° 55.396'N	98° 8.299'O	590183.62 E	2203220.84 N

3.2.2 Equipo de medición

Para el registro de datos se utilizaron 2 consolas ADU-07e de 5 canales cada una, de la marca Metronix, que constan de unidad de adquisición, filtrado y amplificación de señales, contiene también un módulo de almacenamiento de datos. Para medir el campo eléctrico se utilizaron electrodos EFP-06 no polarizables de tipo Pb-PbCl₂ sellados. Para la medición de las variaciones del campo magnético se emplearon bobinas de inducción MFS-06e que permiten cubrir un rango de frecuencias desde 0.0001 Hz hasta 10kHz. La Figura 16 muestra un sistema completo con sus componentes.



Figura 16. Equipo de registro magnetotelúrico: a) Consola de registro ADU-07e. b) Electrodo EFP-06. c) Bobinas de inducción MFS-06e (imágenes tomadas de las fichas técnicas de Metronix).

3.2.3 Implementación del equipo en campo y registro de datos.

Partiendo del centro del arreglo o punto de medición, se colocaron correctamente los electrodos y las bobinas de inducción para obtener un arreglo como el que se observa en la Figura 17 siguiendo el proceso que se describe a continuación.

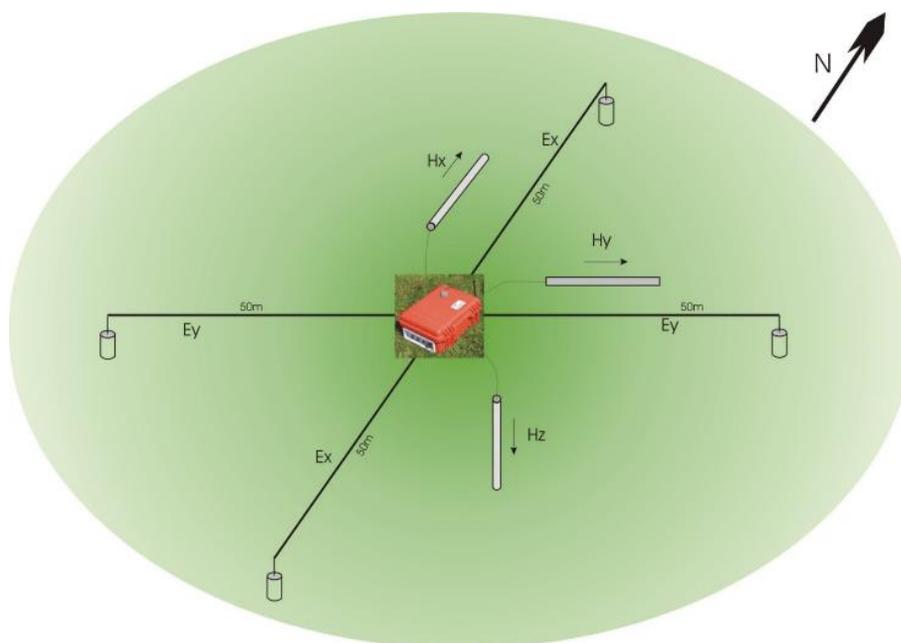


Figura 17. Esquema de un arreglo típico de consola de registro, sensores eléctricos y magnéticos en un sitio de mediciones de datos MT (tomado de ficha técnica de Metronix).

Para la medición de las componentes del campo eléctrico E_x y E_y se instalaron 4 electrodos separados 50 metros del centro del arreglo y orientados, mediante brújula, al norte, sur, este y oeste respectivamente, para conformar 2 dipolos de 100 m de separación entre electrodos. Cada electrodo fue colocado en un agujero de 15 a 20 centímetros de profundidad, humedecido para tener una mezcla de lodo, la cual permite tener una baja resistencia de contacto entre el suelo y el electrodo. Un electrodo adicional, enterrado al centro del arreglo funciona como descarga a tierra para protección del instrumento. El arreglo de los dipolos genera cuatro cuadrantes en el terreno, estos cuadrantes facilitan la ubicación del lugar en el que se instalarán las bobinas que miden las variaciones de las componentes H_x , H_y y H_z del campo magnético. Las bobinas que miden componentes H_x y H_y se ubicaron a un par de metros de separación de la consola de registro y se enterraron a una profundidad entre 15 y 20 centímetros, teniendo cuidado de mantener su nivel horizontal y además alineándolas con dirección norte-sur (NS) y este-oeste (EW) respectivamente. Para medir la componente H_z , usamos una tercera bobina enterrada al menos hasta la mitad de su propia longitud en posición vertical. Los dipolos y las bobinas se conectan mediante cables a la consola de registro. Se debe tener especial cuidado en evitar las vibraciones en los cables, electrodos y bobinas ya que pueden generar ruido a la señal.

En la Figura 18 se muestra parcialmente el proceso de instalación de los electrodos y las bobinas así como su conexión a la consola de registro, también se muestra una parte del arreglo en campo.

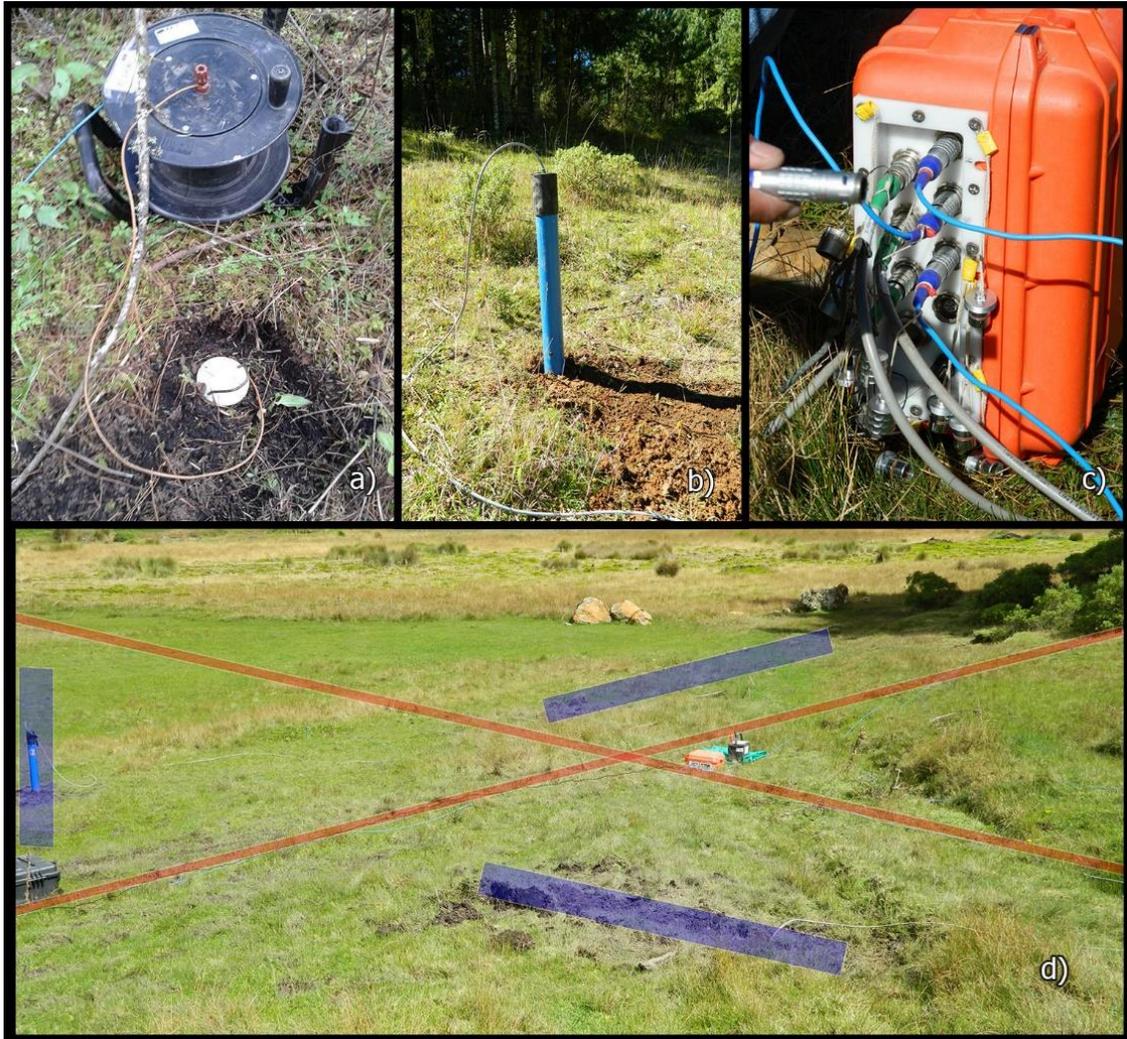


Figura 18. a) Instalación de electrodo en campo antes de ser cubierto totalmente. b) Bobina de inducción para medir la componente H_z del campo magnético enterrada verticalmente. c) Conexiones mediante cableado especial de los electrodos y bobinas a la consola de registro. d) Arreglo en campo de un punto de medición, las líneas rojas indican las orientaciones NS y EW sobre las cuales se ubicarán los electrodos, en el cruce de las líneas se observa la consola de registro y los rectángulos sombreados en azul señalan la colocación de las bobinas de inducción.

Después de la correcta instalación del arreglo, se hizo la programación de la consola para iniciar el registro de las series de tiempo, considerando la frecuencias de muestreo de 4096 Hz para el registro de la banda de alta frecuencia ($>1\text{Hz}$) y la de 128 Hz para el registro de una banda de bajas frecuencias ($<1\text{Hz}$). El tiempo de muestreo para la banda de frecuencia alta osciló entre 10 y 15 minutos, mientras que para la frecuencia baja se hicieron muestreos con tiempos diferentes en cada estación que oscilaron entre 7 y 12 horas.

3.2.4 Procesamiento de series de tiempo

A los registros de las series de tiempo se les aplicó un procesamiento para construir las curvas de resistividad aparente y fase de los sitios medidos. Lo anterior se hizo usando el programa Mapros/SE de la compañía Metronix. El procesamiento de las series de tiempo consistió en seleccionar y excluir de forma manual los segmentos de la serie de tiempo con ruido o que estaban fuera del rango de medición (Figura 19), diezmar la señal limpia y obtener la resistividad y fase de cada banda para finalmente obtener las resistividades aparentes y fases de cada banda en una sola curva (Figura 20).

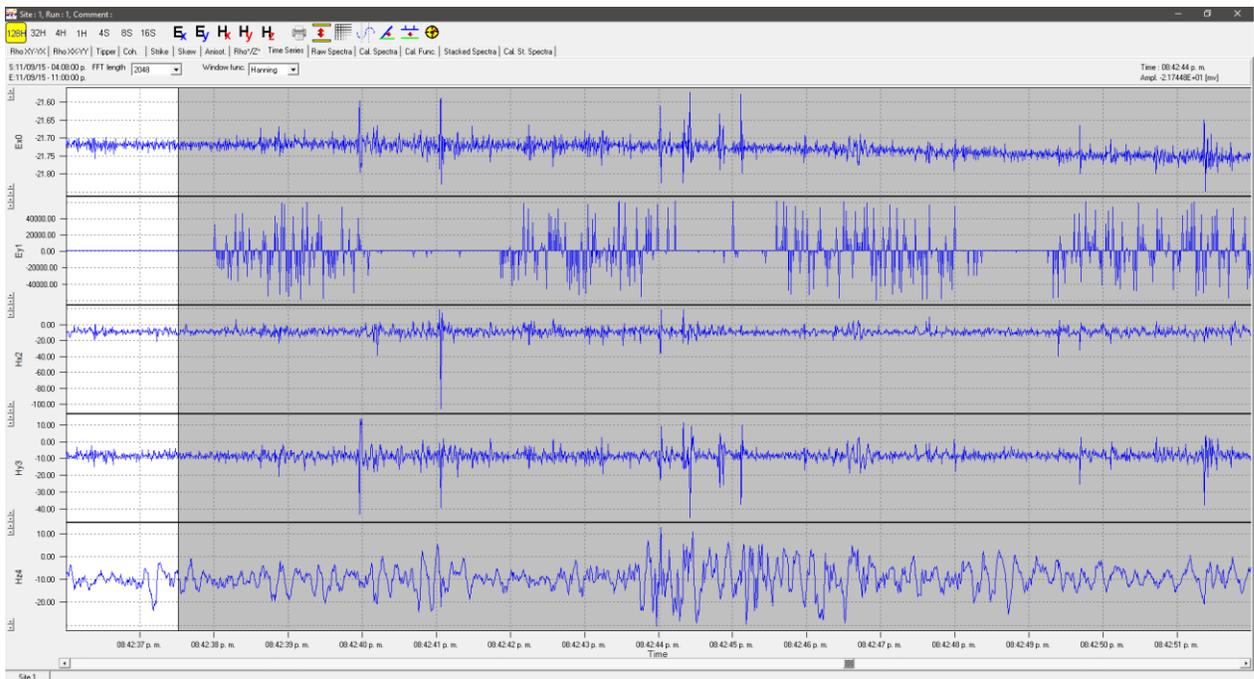


Figura 19. Ejemplo de la selección de los segmentos en la serie de tiempo que serán eliminadas del procesamiento por presentar ruido o estar fuera del rango de medición.

La información de las resistividades aparentes y fases se almacenaron en un archivo en formato de intercambio de datos electromagnéticos (Electromagnetic Data Interchange, -EDI- por sus siglas en inglés) y también en un formato ASCII de salida.

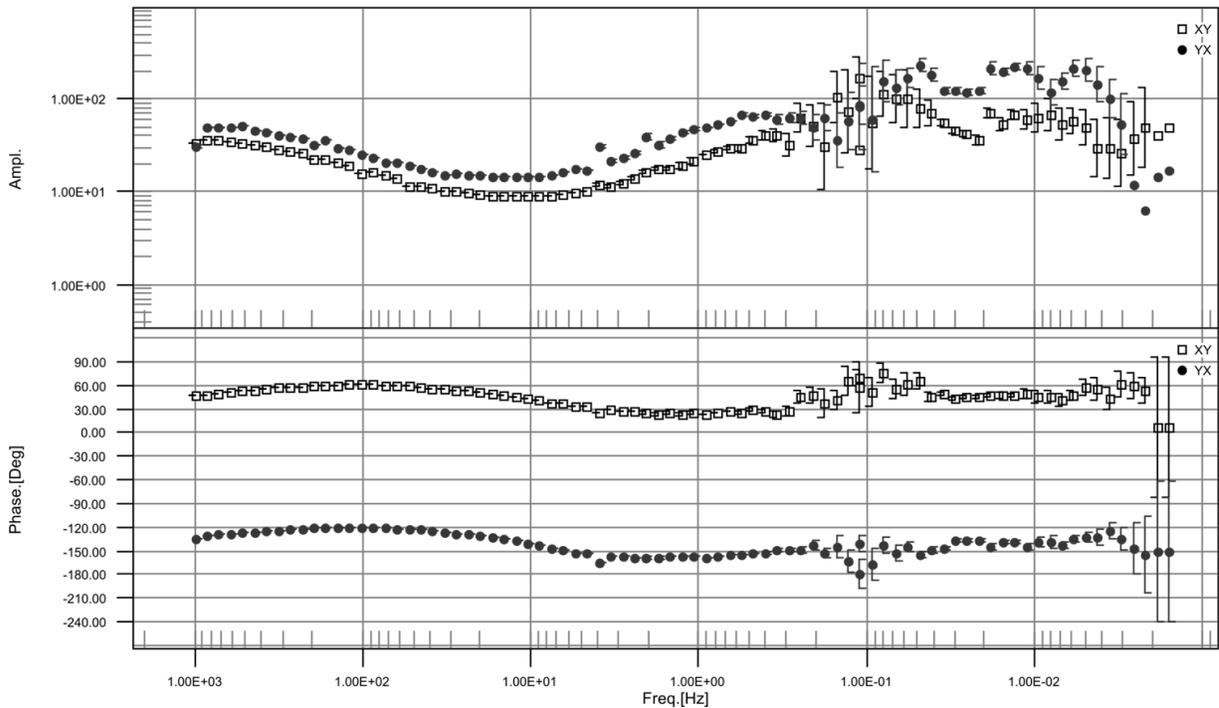


Figura 20. Ejemplo de las curvas de resistividad aparente y fase obtenida para el sitio MT-01.

3.2.5 Inversión de datos

El proceso de optimización que permite obtener un modelo de las características del subsuelo, a partir de un conjunto de datos registrados en la superficie recibe el nombre de inversión de datos. En este estudio se realizó la inversión 1D de las curvas de resistividad aparente y fase correspondientes a los sondeos MT-01 y MT-02 medidos en la superficie, para determinar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo. La ubicación de los sondeos MT-01 y MT-02 cercana a los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 respectivamente, fue el principal factor para seleccionar esos sondeos para su interpretación.

3.2.6 Inversión tipo Occam 1D

El principio de Occam señala que cuando se tienen soluciones alternativas a un problema, la más sencilla es la más probable de ser correcta. La inversión de datos MT tipo Occam (en 1D) busca la distribución de resistividad del subsuelo más simple que pueda explicar satisfactoriamente los datos observados de resistividad aparente y fase. En la inversión 1D se considera que la resistividad del subsuelo varía

solamente con la profundidad. El algoritmo utilizado para la inversión de los datos está basado en la inversión tipo Occam 1D (Constable *et al.*, 1987) y fue desarrollado considerando el proceso descrito a continuación.

Se establece el problema inverso mediante la ecuación:

$$d = F(m) + e \quad (54)$$

donde d son los datos registrados, $F(m)$ es la respuesta del modelo directo y e es el error de ajuste. Los modelos se discretizan en un número M de capas de resistividad constante $m = [m_1, m_2, \dots, m_M]$ y con un número N de datos observados $d = [d_1, d_2, \dots, d_N]$, con N errores respectivos $e = [e_1, e_2, \dots, e_N]$.

En la inversión de datos de manera general se usa el criterio de mínimos cuadrados, el cual busca minimizar la diferencia entre los datos observados d y la respuesta del modelo $F(m)$ expresada por medio de la siguiente forma:

$$\|d - F[m]\|^2 \quad (55)$$

La función $F(m)$ es no lineal respecto m , lo cual impide utilizar la técnica estándar de mínimos cuadrados, por lo que se debe realizar la linealización de la función. Los problemas electromagnéticos además presentan inestabilidad numérica, por lo cual pueden no tener solución numérica o pueden presentar más de una solución (problema de no unicidad). Para solucionar numéricamente un problema inverso conocido como “mal planteado” (“ill posed”), Tikhonov (1977) introdujo el “método de regularización” cuya idea básica es incorporar información adicional sobre las incógnitas y así estabilizar la solución. Generalmente, la manera de hacer esto es incorporar algún criterio sobre la suavidad del modelo resultante, es decir, además de minimizar el desajuste el modelo resultante debe ser suave. Para controlar la suavidad o rugosidad del modelo se introduce la norma cuadrática de un operador diferencial y se obtiene el siguiente criterio de optimización:

$$\min \left\{ \|d - F[m]\|^2 + \alpha \|Lm\|^2 \right\} \quad (56)$$

realizando el balance entre el ajuste de los datos $\|d - F[m]\|^2$ y la suavidad del modelo $\|Lm\|^2$ mediante un parámetro de regularización α que en el caso de la inversión tipo Occam son los multiplicadores de Lagrange.

El problema consiste en buscar el mínimo de una función sujeta a una restricción, en este caso se tiene la condición de minimizar la rugosidad del modelo sujeta a una condición de un máximo ajuste a las observaciones. Lo anterior se expresa en la siguiente función objetivo:

$$U = \|\partial m\|^2 + \mu^{-1} \left\{ \|\mathbf{W}d - \mathbf{W}F[m]\|^2 - \chi_*^2 \right\} = 0 \quad (57)$$

Siendo el primer término $\|\partial m\|^2$ el operador diferencial que regula la suavidad-rugosidad; en el segundo término, el cual corresponde a la condición de ajuste, encontramos a μ^{-1} que es el multiplicador de Lagrange o parámetro de regularización, \mathbf{W} representa la matriz de covarianza que pondera a los datos según su incertidumbre y χ_*^2 que es el nivel de error esperado.

Si se linealiza la función objetivo a partir de linealizar la función $F[m]$ en un desarrollo de Taylor $F[m_2] = F[m_1 + \Delta]$ con $\Delta = m_2 - m_1$, al sustituirse en la ecuación (57) y reacomodando términos obtenemos:

$$U = \|\partial m\|^2 + \mu^{-1} \left\{ \|\mathbf{W}\hat{d} - \mathbf{W}\mathbf{J}_1 m_2\|^2 - \chi_*^2 \right\} = 0 \quad (58)$$

siendo $\hat{d} = d_j - F[m_1] + \mathbf{J}_1 m_1$, \mathbf{J}_1 representa la matriz Jacobiana evaluada en m_1 . La minimización de la ecuación (58), permite acercarnos iterativamente a la solución. La inversión 1D utiliza como datos observados la resistividad aparente y la fase calculadas a partir del determinante del tensor de impedancias ecuación (50).

4. Resultados y discusión

4.1 Resultados

4.1.1 Modelos térmicos

4.1.1.1 Base de datos

La investigación bibliográfica realizada para poder seleccionar de manera confiable el rango de valores de las propiedades termofísicas de las unidades litológicas utilizadas en los modelos térmicos, permitió construir una base de datos que recopila diferentes valores de la conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica. La base de datos obtenida se incluyó en el Anexo A.

4.1.1.2 Perfiles de temperaturas

Se obtuvieron 16 diferentes modelos térmicos para la simulación del comportamiento de los campos de temperaturas en cada uno de los pozos exploratorios. Se evaluaron temperaturas de 600, 650, 700 y 750°C en la base de los modelos y con cada una de ellas una variación de 4 grupos de conductividades térmicas para cada columna litológica, nombrados K1, K2, K3 y K4 respectivamente. Las otras propiedades físicas y condiciones iniciales se mantuvieron constantes (Tabla 3).

Las Tablas 6 y 7 muestran los diferentes conjuntos de valores de las conductividades térmicas, usados para obtener los correspondientes modelos para cada temperatura propuesta en la base de los pozos EAC-1 y EAC-2 respectivamente.

Tabla 6. Grupos de valores de conductividades térmicas utilizadas en los modelos correspondientes al pozo EAC-1.

EAC-1 Grupo de conductividades térmicas k (W/mK)										
Grupo	Toba	Dacita	Ignimbrita	Riodacita	Skarn	Mármol	Skarn	Aplita	Mármol	Granito
K1	1.40	1.87	1.65	2.08	1.60	2.80	1.60	2.90	2.80	2.68
K2	1.40	1.87	1.65	2.08	1.60	2.50	1.60	2.00	1.80	2.10
K3	1.40	2.00	1.70	2.20	1.80	2.50	1.60	2.00	1.80	2.10
K4	1.80	1.87	1.65	1.90	1.40	2.50	1.60	2.00	1.80	2.10

Tabla 7. Grupos de valores de conductividades térmicas utilizadas en los modelos correspondientes al pozo EAC-2.

Grupo	EAC-2 Grupo de conductividades térmicas k (W / mK)						
	Ignimbrita	Andesita	Dacita	Andesita	Caliza	Hornfels	Granito
K1	1.65	1.72	1.87	1.72	2.37	2.41	2.10
K2	1.65	1.72	1.87	1.72	2.37	2.41	2.00
K3	1.65	1.72	1.87	1.72	2.37	2.41	1.90
K4	1.65	1.72	1.87	1.72	2.60	3.00	2.20

Para obtener los modelos térmicos del pozo EAC-2, las conductividades térmicas de las primeras cuatro unidades litológicas (Ignimbrita, Andesita, Dacita, Andesita) permanecieron sin cambios en los cuatro grupos K1, K2, K3 y K4; mientras que para las unidades de caliza y hornfels, solo cambiaron para el grupo K4. El granito fue la unidad litológica que tuvo diferentes valores de conductividades térmicas en cada grupo.

Para analizar las curvas de temperaturas obtenidas después de un tiempo de simulación $t=0.25\text{Ma}$, que son las de interés en este estudio, se calculó el error normalizado de las temperaturas simuladas en los modelos térmicos respecto a los valores de las temperaturas medidas en los pozos usando la expresión:

$$e_n = \left(\frac{t_s - t_o}{t_o} \right) * 100 \quad (59)$$

donde e_n representa el error normalizado expresado en porcentaje, t_s la temperatura simulada ($^{\circ}\text{C}$) y t_o la temperatura observada en los registros de pozo ($^{\circ}\text{C}$). Cuanto más cercano sea el error normalizado a cero, se considera mejor el ajuste. Para los modelos del pozo EAC-1 el mejor ajuste se obtuvo con una temperatura propuesta en la base de 650°C , asociada al grupo de conductividades K1 (Tabla 8), mientras que para el pozo EAC-2 el modelo con el mejor ajuste corresponde a una temperatura propuesta en la base de 750°C asociada al grupo de conductividades K4 correspondiente a su columna litológica (Tabla 9). La Tabla 10 muestra la sumatoria de los valores absolutos de los errores normalizados obtenidos en los 32 modelos, los valores más pequeños corresponden a la curva con mejor ajuste. Los valores de los errores normalizados obtenidos para los 32 modelos térmicos se presentan en las tablas del Anexo B

Tabla 8. Valores absolutos de los errores normalizados para las temperaturas simuladas en el pozo EAC-1 para cada grupo de conductividades térmicas comparadas con las temperaturas registradas en pozo.

Modelo térmico EAC-1 T 650									
Pozo EAC-1		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
100	45	36.3	19.3	32.4	27.9	32.9	26.9	31.8	29.2
200	62	52.3	15.7	45.5	26.6	45.9	26.0	44.5	28.3
400	85	80.0	5.8	68.2	19.7	68.0	19.9	67.5	20.6
500	100	92.8	7.2	78.7	21.3	78.2	21.8	78.6	21.4
600	115	105.7	8.1	89.2	22.4	88.5	23.1	89.7	22.0
800	140	131.4	6.1	110.4	21.2	109.0	22.2	112.1	19.9
1000	168	163.7	2.6	136.9	18.5	133.4	20.6	141.3	15.9
1200	192	197.8	3.0	165.0	14.1	159.0	17.2	172.4	10.2
1400	220	224.8	2.2	188.3	14.4	182.3	17.1	195.8	11.0
1600	245	258.7	5.6	216.9	11.5	211.5	13.7	223.6	8.7
1650	252	263.5	4.6	222.9	11.5	217.6	13.7	229.4	9.0
1700	261	268.6	2.9	229.2	12.2	224.0	14.2	235.6	9.7
1750	270	273.9	1.4	234.8	13.0	229.7	14.9	241.0	10.7
1800	280	279.2	0.3	240.4	14.1	235.5	15.9	246.5	12.0
1850	285	284.5	0.2	246.1	13.6	241.3	15.3	252.1	11.6
1900	292	289.8	0.7	251.8	13.8	247.1	15.4	257.6	11.8
1950	300	295.2	1.6	257.5	14.2	252.9	15.7	263.2	12.3
1970	307	297.9	3.1	260.4	15.3	255.8	16.8	266.0	13.4
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			90.4		305.3		330.3		277.7
Ajuste Promedio			5.0%		17.0%		18.4%		15.4%

Tabla 9. Valores absolutos de los errores normalizados para las temperaturas simuladas en el pozo EAC-2 con cada grupo de conductividades térmicas comparadas con las temperaturas registradas en pozo.

Modelo térmico EAC-2 T 750									
Pozo EAC-2		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
50	30	17.1	43.0	17.0	43.3	16.9	43.6	17.3	42.3
200	40	42.1	5.2	40.9	2.2	39.7	0.7	44.8	12.1
400	80	72.2	9.7	69.8	12.8	67.3	15.9	78.1	2.4
600	105	97.2	7.4	93.6	10.8	90.1	14.2	102.9	2.0
800	125	120.3	3.7	115.8	7.4	111.2	11.0	123.3	1.3
1000	150	143.7	4.2	138.1	7.9	132.6	11.6	143.9	4.1
1050	155	149.5	3.5	143.7	7.3	137.9	11.0	149.1	3.8
1100	160	155.4	2.9	149.4	6.6	143.3	10.4	154.3	3.6
1150	165	161.3	2.2	155.0	6.1	148.7	9.9	159.5	3.4
1200	170	167.2	1.6	160.7	5.5	154.1	9.3	164.7	3.1
1250	175	173.1	1.1	166.3	4.9	159.6	8.8	169.9	2.9
1300	180	179.1	0.5	172.0	4.4	165.0	8.3	175.1	2.7
1350	185	185.0	0.0	177.7	3.9	170.5	7.9	180.3	2.5
1400	190	191.0	0.5	183.5	3.4	176.0	7.4	185.6	2.3
1450	195	197.0	1.0	189.2	3.0	181.5	6.9	190.8	2.1
1500	200	203.0	1.5	195.0	2.5	187.0	6.5	196.1	2.0
1550	202	209.0	3.5	200.8	0.6	192.5	4.7	201.4	0.3
1600	210	215.1	2.4	206.6	1.6	198.1	5.7	206.7	1.6
1650	215	221.3	3.0	212.7	1.1	204.0	5.1	212.5	1.2
1700	220	228.3	3.8	219.7	0.1	211.1	4.1	219.7	0.1
1750	225	235.3	4.6	226.8	0.8	218.2	3.0	227.0	0.9
1800	232	242.4	4.5	233.8	0.8	225.4	2.9	234.3	1.0
1850	240	249.4	3.9	241.0	0.4	232.5	3.1	241.6	0.7
1900	264	256.5	2.8	248.1	5.9	239.7	9.1	248.9	5.6
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			116.6		143.6		221.3		104.1
Ajuste Promedio			4.9%		6.0%		9.2%		4.3%

Tabla 10. Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados y su ajuste promedio en porcentaje, obtenidos para cada modelo térmico de acuerdo a la temperatura propuesta en la base y al grupo de conductividades térmicas asociado a la litología de cada pozo.

Modelo térmico	Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados y su ajuste promedio expresado en porcentaje.			
	K1	K2	K3	K4
EAC-1 T600	170.6 (9.5%)	403.7 (22.4%)	427.0 (23.7%)	377.9 (21.0%)
EAC-1 T650	90.4 (5.0%)	305.3 (17.0%)	330.3 (18.4%)	277.7 (15.4%)
EAC-1 T700	129.0 (7.2%)	207.0 (11.5%)	233.7 (13.0%)	177.5 (9.9%)
EAC-1 T750	225.6 (12.5%)	112.7 (6.3%)	189.4 (10.5%)	114.5 (6.4%)
EAC-2 T600	456.5 (19.0%)	524.3 (21.8%)	591.9 (24.7%)	479.9(20.0%)
EAC-2 T650	320.6 (13.4%)	394.6 (16.4%)	468.4 (19.5%)	349.4 (14.6%)
EAC-2 T700	186.3 (7.8%)	264.9 (11.0%)	344.8 (14.4%)	224.3 (9.3%)
EAC-2 T750	116.6 (4.9%)	143.6 (6.0%)	221.3 (9.2%)	104.1 (4.3%)

En los modelos térmicos EAC-1 T600 se puede observar que con una temperatura de 600°C propuesta para la base del modelo, las curvas de temperaturas simuladas para los cuatro grupos de conductividades térmicas siempre quedaron por debajo de los valores registrados en pozo (Figura 21a-d). La curva de temperatura correspondiente al grupo K1 es la que presenta el mejor ajuste en este conjunto de modelos (Figura 21a). Para el modelo correspondiente al grupo K2 se hizo una disminución en las conductividades térmicas de las últimas cinco unidades litológicas pero el ajuste de las curvas no mejoró (Figura 21b). Los grupos K3 y K4 aumentaban y disminuían respectivamente el valor de las conductividades térmicas en las primeras cinco unidades litológicas pero tampoco mejoraron el ajuste de las curvas (Figura 21c-d).

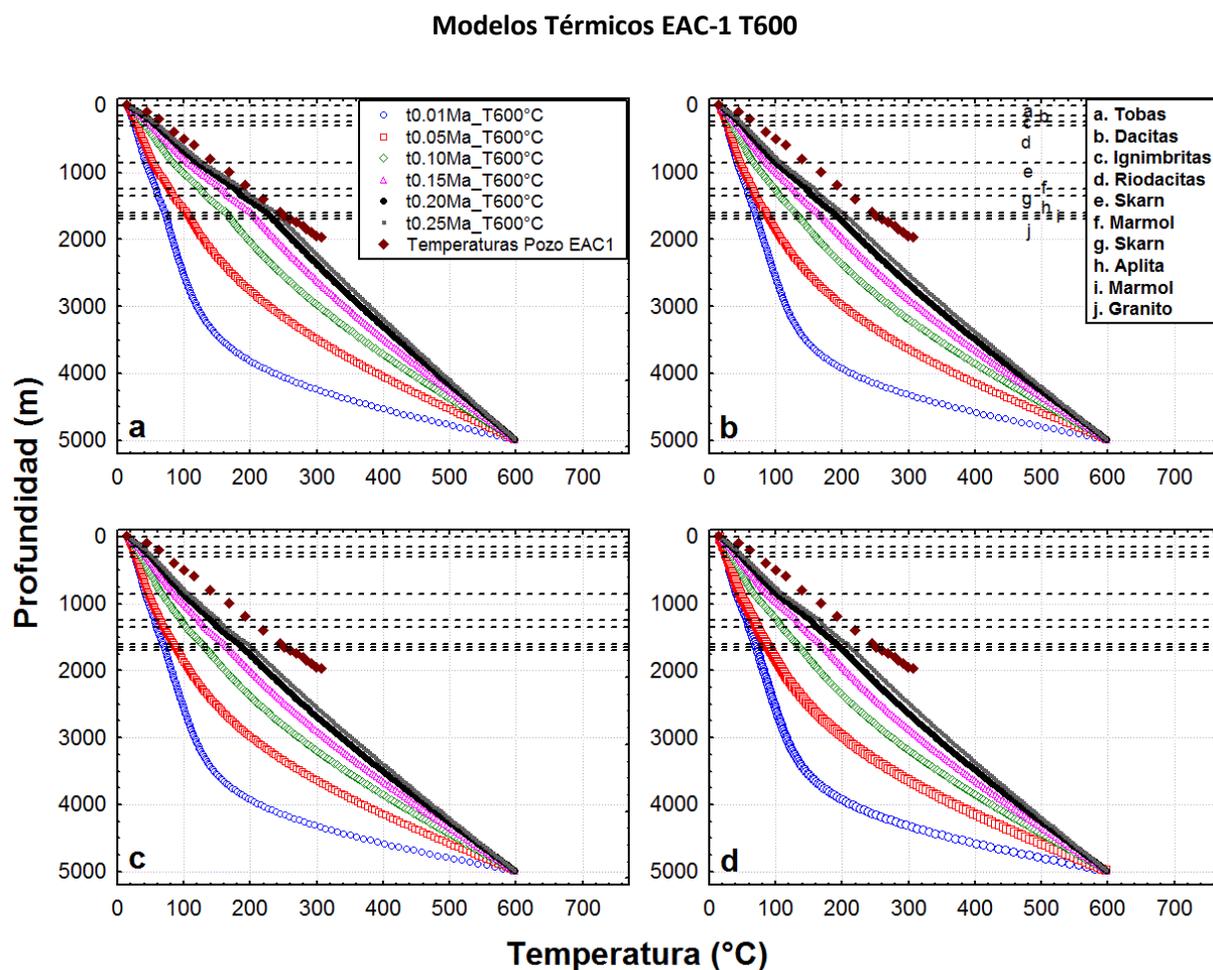


Figura 21. Modelos térmicos para el pozo EAC-1 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 600°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (21a) y K2 (21b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (21c) y K4 (21d) respectivamente. En la Figura 21a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación, y en la Figura 21b la leyenda muestra la litología del pozo.

En los modelos térmicos EAC-1 T650 se obtuvo el modelo con la curva de temperatura que presentó el mejor ajuste del total de los 16 modelos construidos para el pozo mencionado. Este modelo (Figura 22a) corresponde al grupo de conductividades térmicas K1, en varios puntos de este modelo el error normalizado fue muy cercano a 0 y en la mayoría menores a 5%. Las curvas de temperatura simuladas con los otros 3 grupos de conductividades térmicas (K2, K3 y K4), presentaron temperaturas menores a las registradas en el pozo (Figura 22b-d).

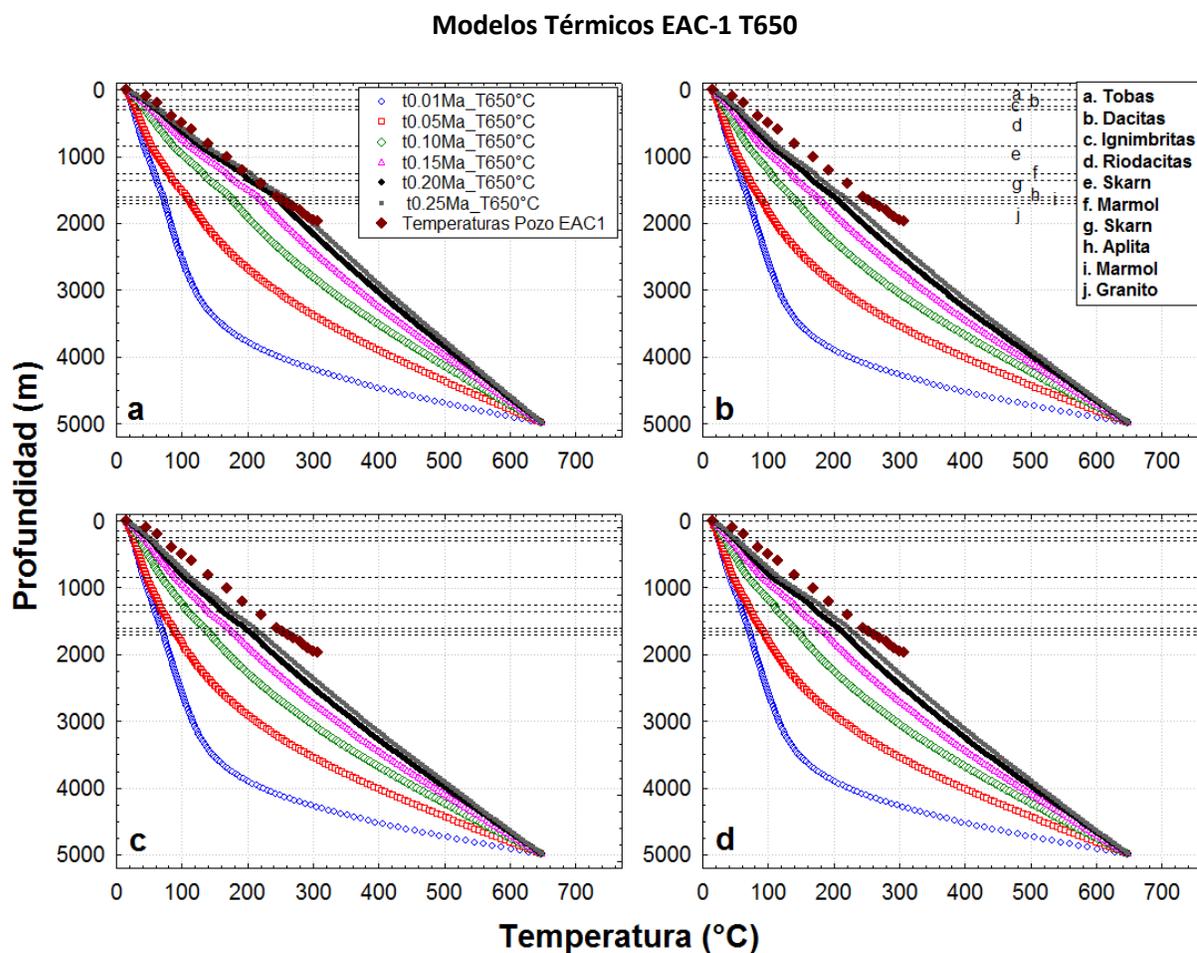


Figura 22. Modelos térmicos para el pozo EAC-1 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 650°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (22a) y K2 (22b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (22c) y K4 (22d) respectivamente. En la Figura 22a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (22a-d) y en la Figura 22b la leyenda muestra la litología.

Para los modelos térmicos EAC-1 T700 la curva de temperaturas simuladas con mejor ajuste se obtiene también con el grupo de conductividades térmicas K1 (Figura 23a), esta curva de temperaturas muestra un buen ajuste en los primeros 1200 m al presentar errores normalizados menores a 2%. Las temperaturas simuladas después de los 1200 m para ese grupo de conductividades térmicas están arriba de las temperaturas registradas en el pozo. Para el resto de los modelos, las temperaturas simuladas con los otros tres grupos de conductividades térmicas (K2, K3 y K4) continúan por debajo de las temperaturas de registro.

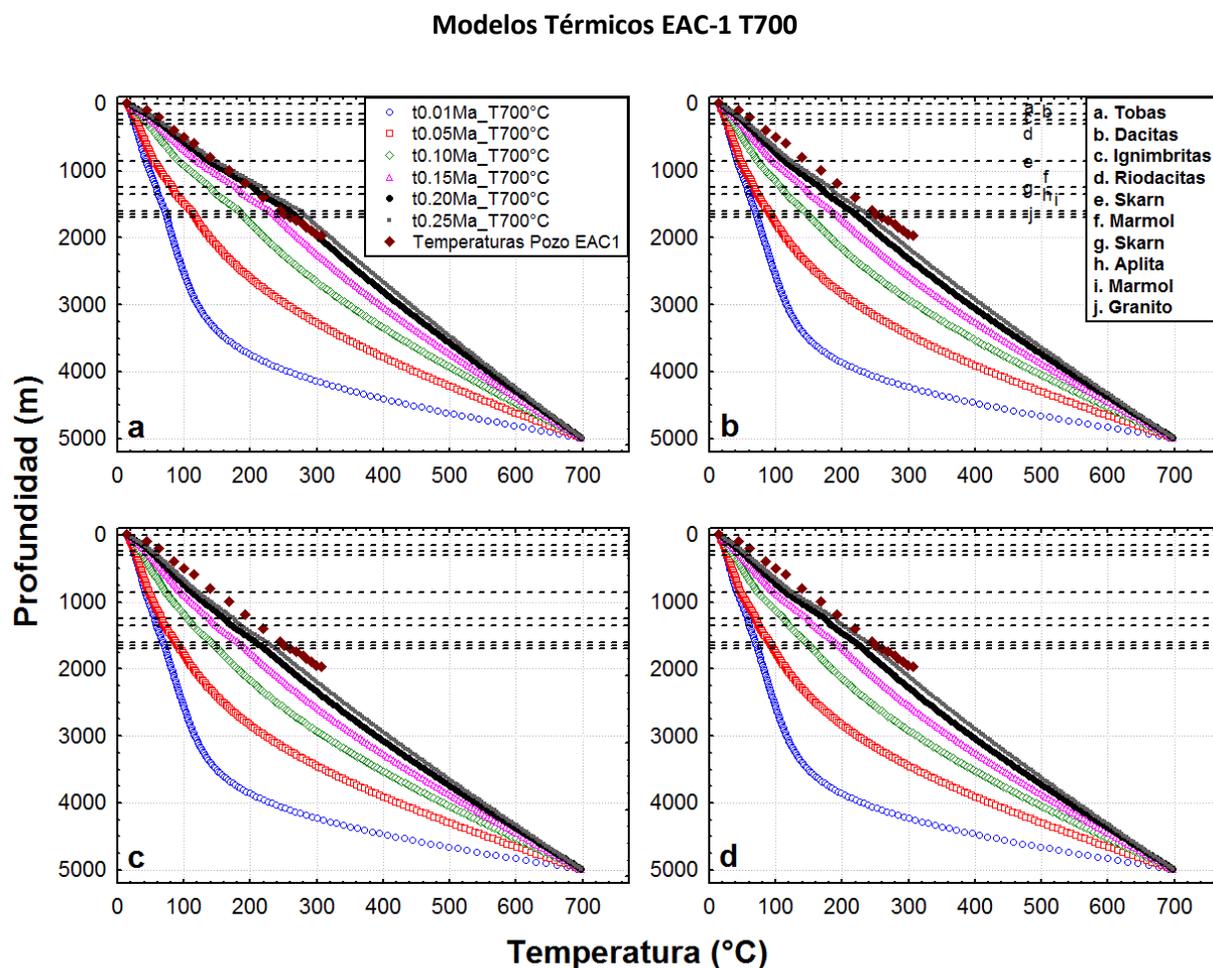


Figura 23. Modelos térmicos para el pozo EAC-1 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 700°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (23a) y K2 (23b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (23c) y K4 (23d) respectivamente. En la figura 23a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (23a-d) y en la Figura 23b la leyenda muestra la litología.

El último conjunto de modelos simulados para el pozo EAC-1 tiene una temperatura propuesta para la base del modelo de 750°C (Figura 24a-d). A diferencia de los casos anteriores, en este conjunto, el grupo de conductividades térmicas K2 es el que presenta la curva de temperaturas con el mejor ajuste (Figura 24b), en la cual las temperaturas simuladas entre 1600 y 1950 m presentan errores normalizados con valores menores a 2%. La simulación con el grupo de conductividades K4 también tiene un buen ajuste, principalmente entre 1000 y 1800 m, en donde se presentan errores normalizados menores a 4%. En este conjunto de modelos, la simulación con el grupo de conductividades K3 (Figura 24c) es el único en quedarse con temperaturas menores a las registradas en pozo en contraste con las el grupo K1, en el cual las temperaturas calculadas después de los primeros 1000 m de profundidad excedieron por más de 20°C a las temperaturas de registro en pozo.

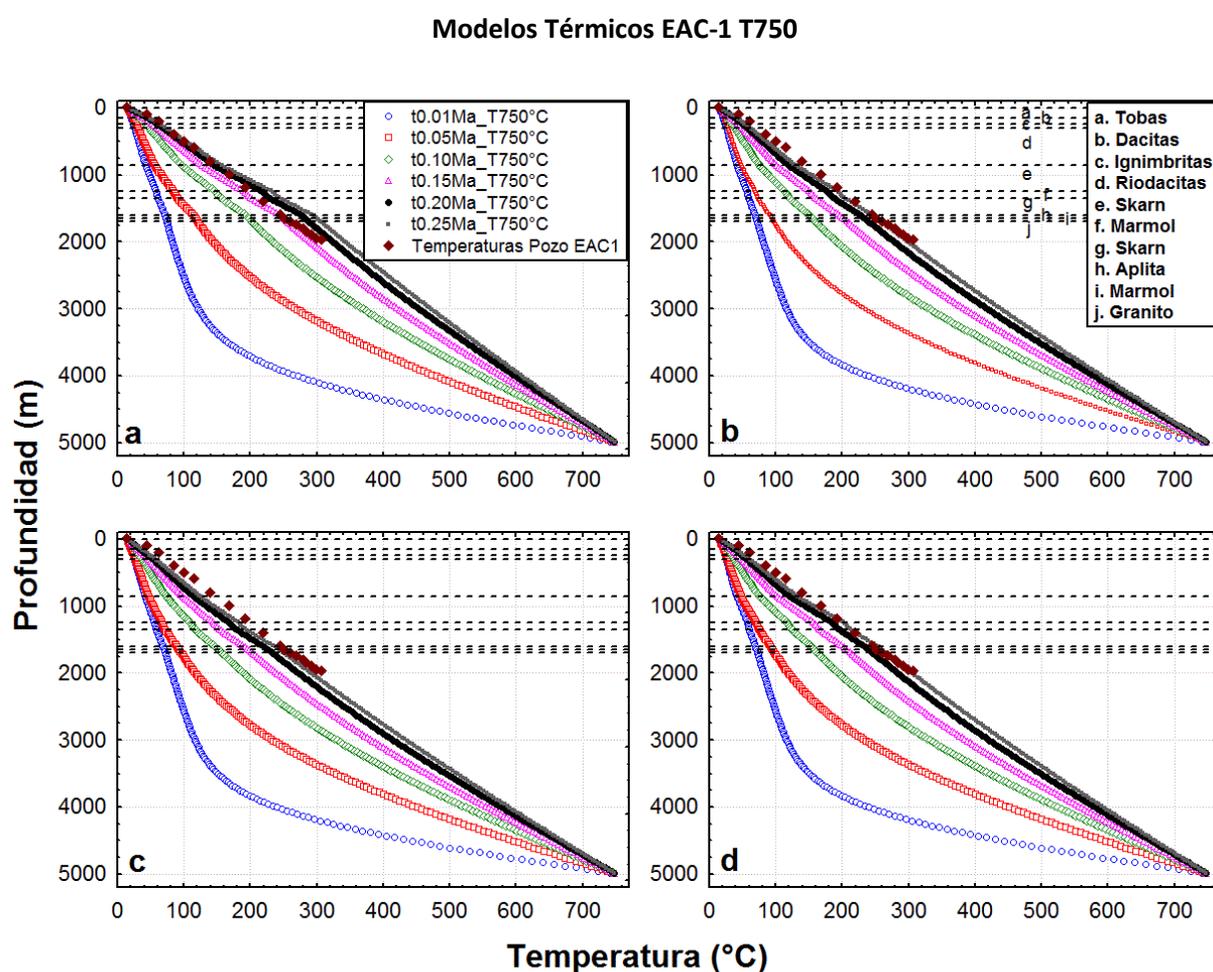


Figura 24. Modelos térmicos para el pozo EAC-1 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 750°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (24a) y K2 (24b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (24c) y K4 (24d) respectivamente. En la figura 24a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (24a-d) y en la Figura 24b la leyenda muestra la litología.

Para los primeros modelos térmicos del pozo EAC-2 en los que se propone una temperatura para la base del modelo de 600°C, no se lograron obtener curvas de temperatura con un ajuste aceptable (Figura 25a-d), las temperaturas simuladas con los diferentes grupos de conductividades térmicas quedaron muy por debajo de las registradas en el pozo, presentando después de los primeros 200 m de profundidad errores normalizados mayores a 15%.

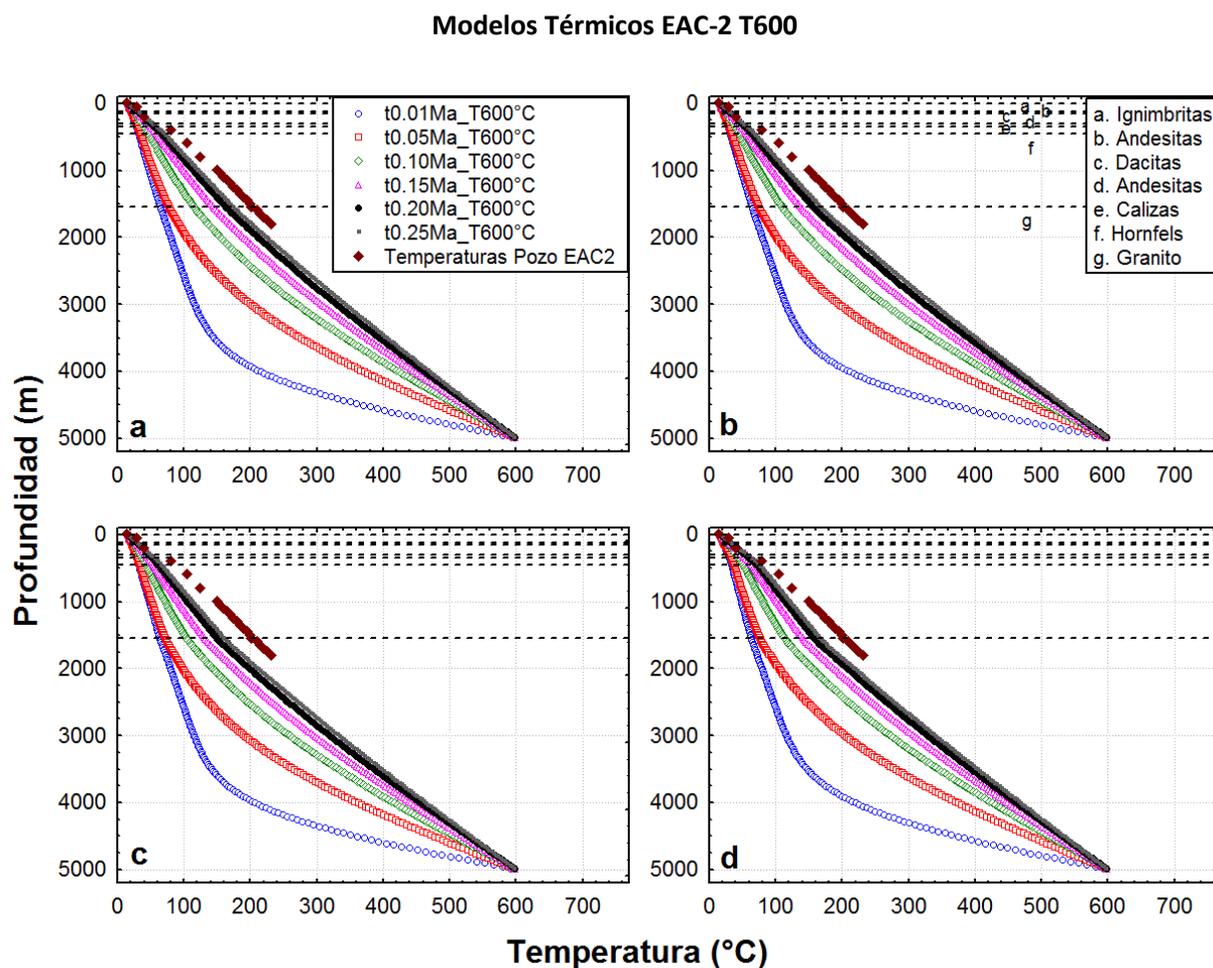


Figura 25. Modelos térmicos para el pozo EAC-2 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 600°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (25a) y K2 (25b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (25c) y K4 (25d) respectivamente. En la figura 25a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (25a-d) y en la Figura 25b la leyenda muestra la litología.

Los modelos del conjunto EAC-2 T650 mejoraron un poco al aumentarse la temperatura propuesta para la base del modelo a 650°C (Figura 26a-d). Sin embargo, en la mayoría de las temperaturas simuladas los errores normalizados siguen presentando valores mayores a 10%, por lo que los modelos no se consideran con un buen ajuste.

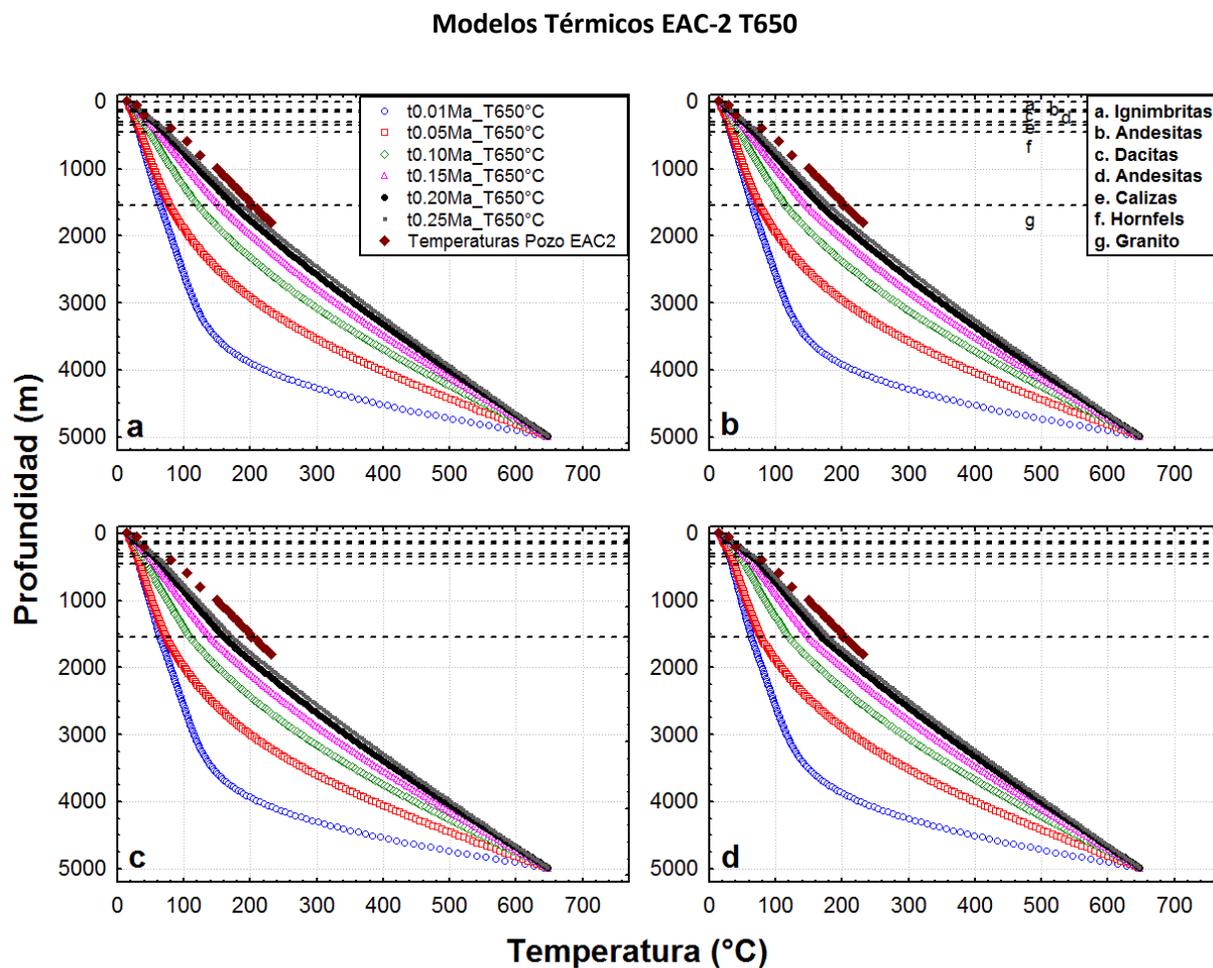


Figura 26. Modelos térmicos para el pozo EAC-2 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 650°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (26a) y K2 (26b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (26c) y K4 (26d) respectivamente. En la figura 26a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (26a-d) y en la Figura 26b la leyenda muestra la litología.

En el conjunto de modelos EAC-2 T700 la temperatura de 700°C propuesta para la base del modelo mejora el ajuste de las curvas de temperaturas simuladas vs las temperaturas de registro en pozo. La curva de temperaturas simulada con mejor ajuste en este conjunto de modelos es la correspondiente al grupo de conductividades térmicas K1 (Figura 27a), donde la mayor parte de temperaturas calculadas presentan errores normalizados con valores entre 5% y 10%, e incluso se llegan a presentar algunos datos con errores normalizados menores a 5%. En el modelo correspondiente al grupo de conductividades térmicas K4 (Figura 27d) la mayoría de los errores normalizados tienen también valores entre 5% y 10%, pero no hay datos con errores normalizados menores a 5%. La mayor parte de los errores normalizados de los modelos correspondientes a los grupos de conductividades térmicas K2 y K3 (Figura 27b y c) presentan valores que oscilan entre 5% y 20%.

Modelos Térmicos EAC-2 T700

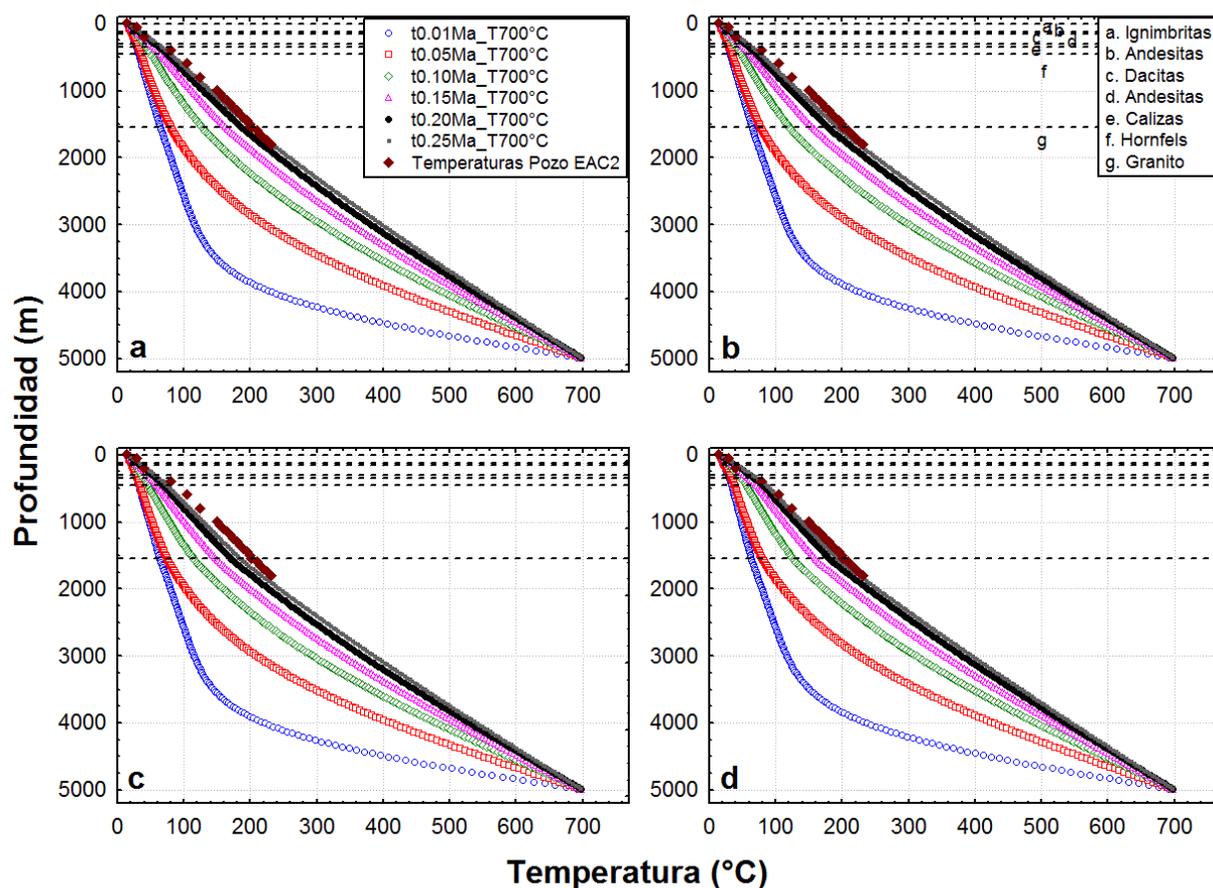


Figura 27. Modelos térmicos para el pozo EAC-2 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 700°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (27a) y K2 (27b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (27c) y K4 (27d) respectivamente. En la figura 27a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (27a-d) y en la Figura 27b la leyenda muestra la litología.

En el conjunto de modelos térmicos EAC-2 T750, se encontró la curva con mejor ajuste de los 16 modelos construidos para el pozo EAC-2 y correspondió al grupo de conductividades térmicas K4, en el cual los errores normalizados de las temperaturas simuladas respecto a las registradas en pozo, presentaron en su mayoría valores menores a 5% y en algunos casos inclusive valores menores a 1% (Figura 28d). Otra curva que también presentó un buen ajuste correspondió al grupo de conductividades térmicas K1 (Figura 28a), con valores de errores normalizados similares a los del grupo K4. Se consideró el modelo K4 como el de mejor ajuste por tener el menor valor en la suma de los valores absolutos de errores normalizados.

Modelos Térmicos EAC-2 T750

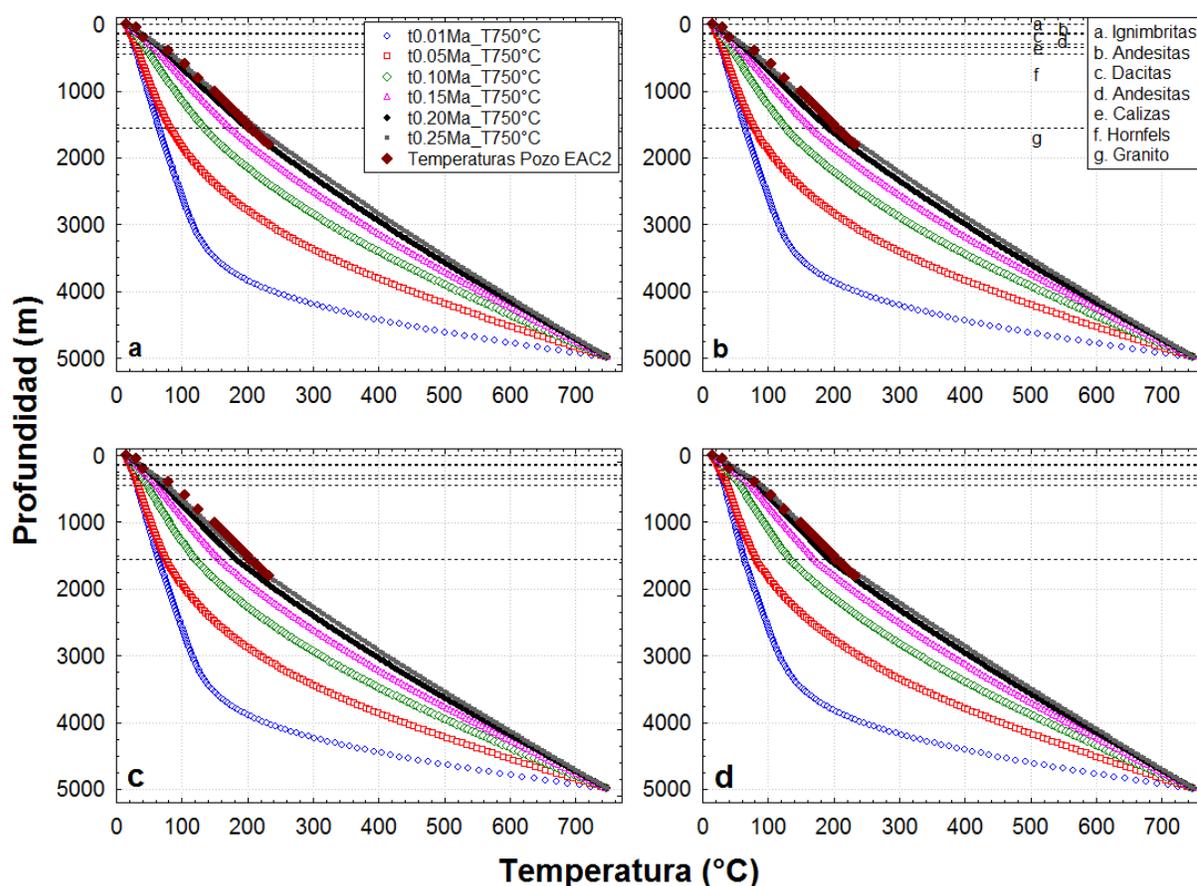


Figura 28. Modelos térmicos para el pozo EAC-2 en los que se observa la evolución del campo de temperaturas simuladas en el tiempo, con una temperatura de 750°C propuesta en la base del modelo. Para los modelos mostrados en la parte superior se utilizaron los grupos de conductividades térmicas K1 (28a) y K2 (28b) respectivamente. Los modelos mostrados en la parte inferior utilizaron los grupos de conductividades térmicas K3 (28c) y K4 (28d) respectivamente. En la figura 28a la leyenda muestra el color de línea correspondiente al tiempo de simulación (28a-d) y en la Figura 28b la leyenda muestra la litología.

4.1.2 Modelos de conductividad eléctrica

4.1.2.1 Curvas de resistividad y fase

Se obtuvieron las curvas de resistividad aparente y fase para los sitios MT-01 (Figura 29a y 29c) y MT-02 (Figura 29b y 29d), usando el determinante del tensor de impedancia (ecuación 50).

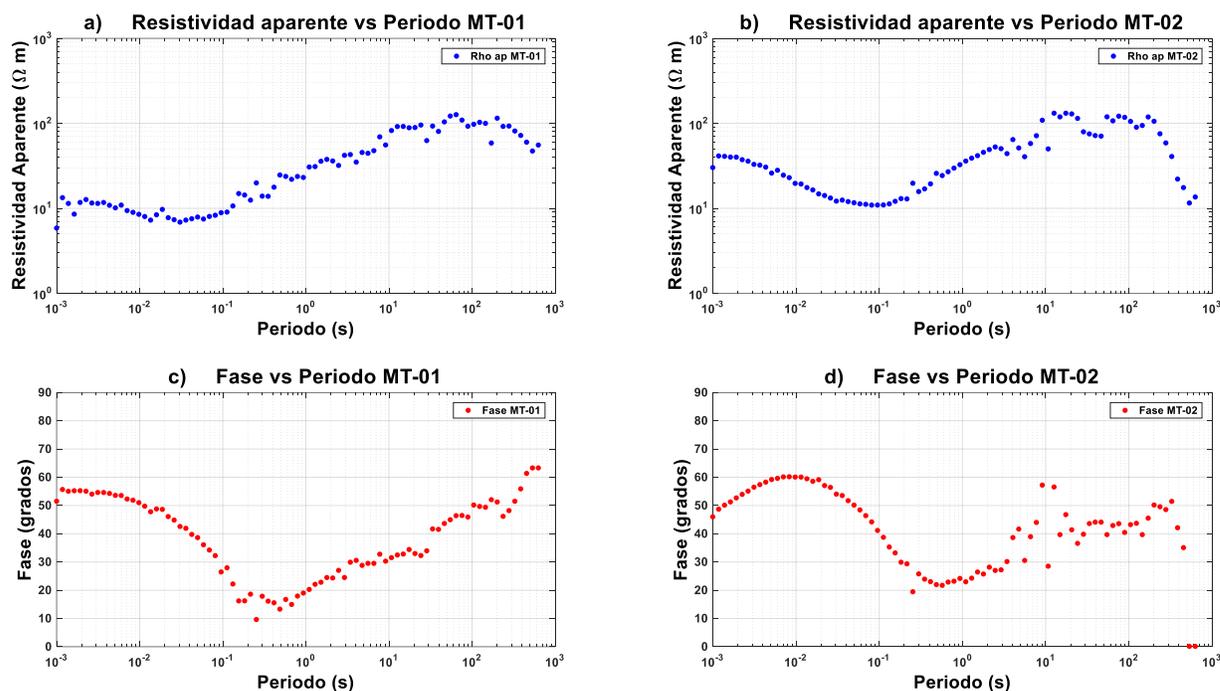


Figura 29. a) y b) Curva de resistividad aparente contra periodo obtenidas a partir del determinante del tensor de impedancia para los sitios MT-01 y MT-02. c) y d) Curva de fase contra periodo de los sitios MT-01 y M-T 02.

Se puede observar al comparar las curvas de ambos sitios que presentan cierta similitud en el comportamiento de los valores de su resistividad aparente y fase. En ambos sitios se sugiere la presencia de una zona de baja resistividad aparente entre los periodos de 0.01 y 1 s, así como un aumento en la resistividad aparente entre 1 y 100 s. Para facilitar la comparación del comportamiento de las curvas de resistividad aparente de ambos sitios en la Figura 30a se han graficado juntas ambas curvas de resistividad aparente. De manera similar en la Figura 30b se realizó lo correspondiente para las curvas de fase.

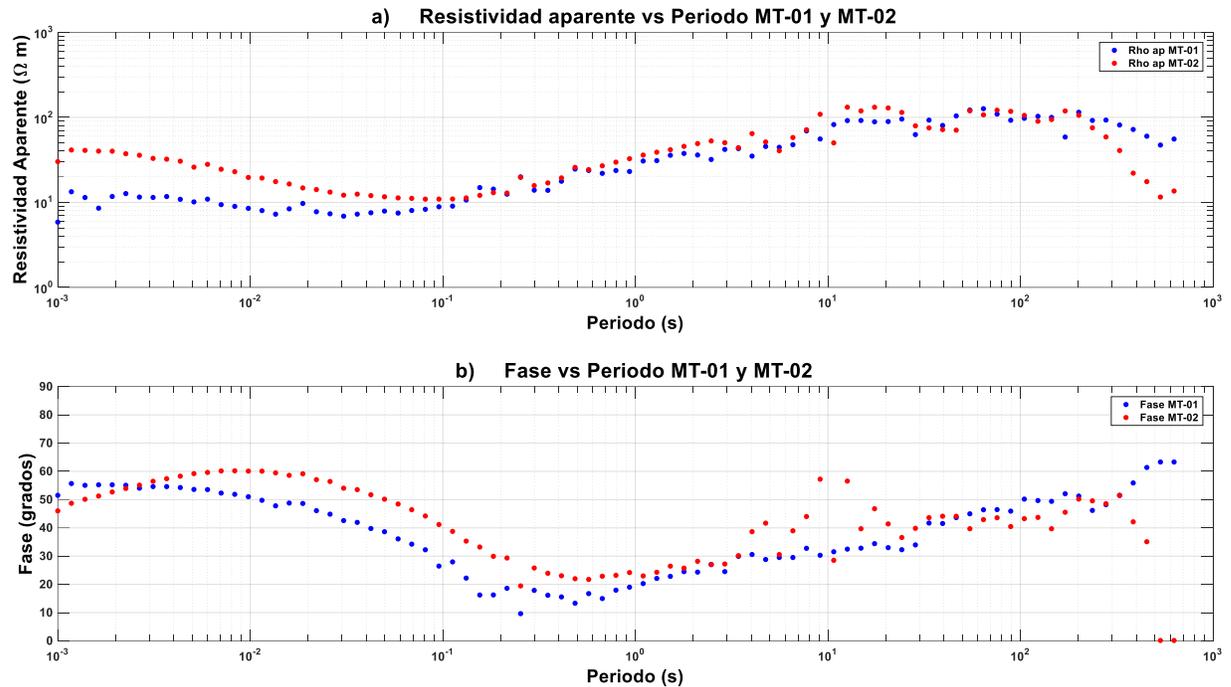


Figura 30. a) Curvas de resistividad aparente contra periodo de los sitios MT-01 (marcadores en azul) y MT-02 (marcadores en rojo) obtenidas a partir del determinante del tensor de impedancia. b) Curva de fase contra periodo de los sitios MT-01 (marcadores en azul) y M-T 02 (marcadores en rojo).

4.1.2.2 Inversión 1D.

Al realizar la inversión de datos mediante el algoritmo de Occam 1D (Constable *et al.*, 1987), se obtuvieron los modelos de resistividad contra profundidad mostrados en las Figuras 31c y 32c. Los ajustes entre la respuesta del modelo y los datos del sitio MT-01 se muestran en las Figuras 31a y 31b, para la resistividad aparente y para la fase, respectivamente. En la Figura 31a se observa un buen ajuste para la resistividad aparente, mientras que en la fase (Figura 31b) solo se ajusta en la banda entre 0.001 y 0.1 s. Para obtener este modelo el programa realizó 20 iteraciones, sin embargo, después de la sexta iteración el ajuste no tuvo mejoras significativas, el rms final fue de 0.43. El modelo (Figura 31c) muestra resistividades menores a $10 \Omega m$ a profundidades entre 100 y 200 m, alcanzando resistividades cercanas a $100 \Omega m$ a profundidades entre 900 y 1200 m. El modelo de resistividades obtenido a partir de los datos del sitio MT-02 muestra también un buen ajuste con respecto a las resistividades aparentes (Figura 32a), sus fases también presentan un buen ajuste en la banda comprendida entre 0.001 y 10 s (Figura 32b). Para obtener este modelo el programa realizó 20 iteraciones y después de la cuarta iteración no mejoró el ajuste, el rms final fue de 0.28. En el modelo (Figura 32C) se puede observar que las resistividades alcanzan valores cercanos a $5 \Omega m$ a profundidades entre 200 y 300 m aumentando a valores cercanos a $200 \Omega m$ para profundidades entre 2 y 3 km.

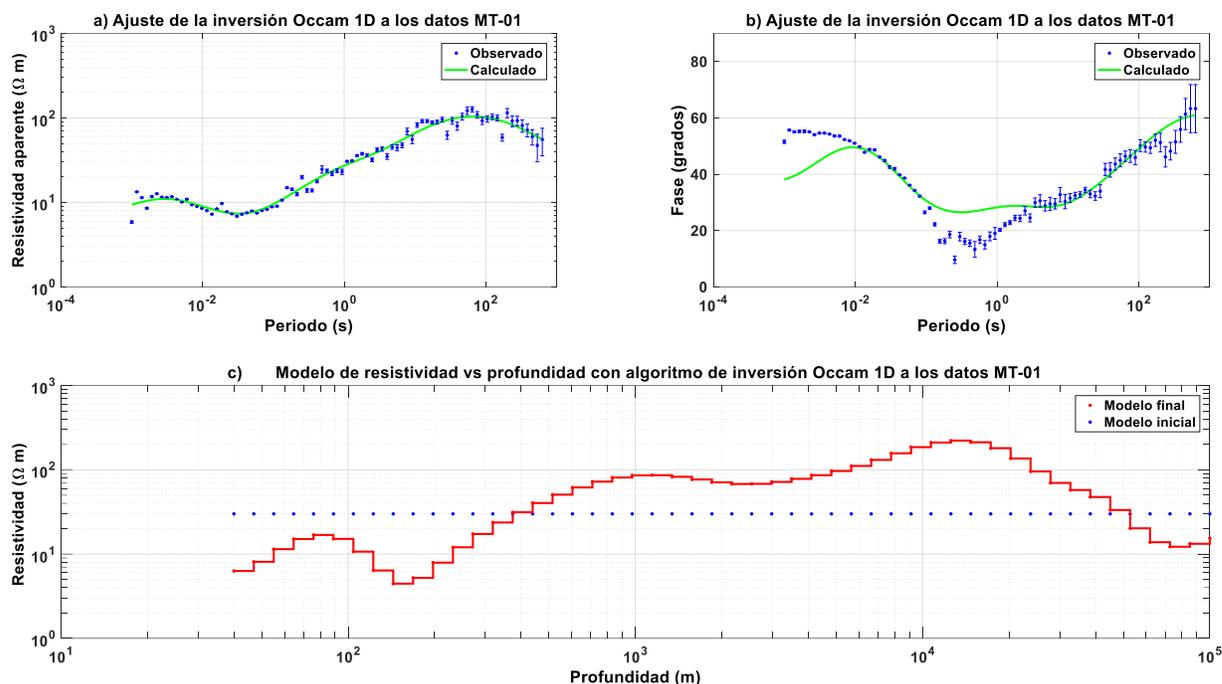


Figura 31. Modelo obtenido aplicando el algoritmo de inversión Occam 1D en el sitio MT-01. a) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de resistividad aparente observados. b) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de fase observados. c) Modelo obtenido de resistividad contra profundidad que describe el comportamiento de la resistividad en el subsuelo.

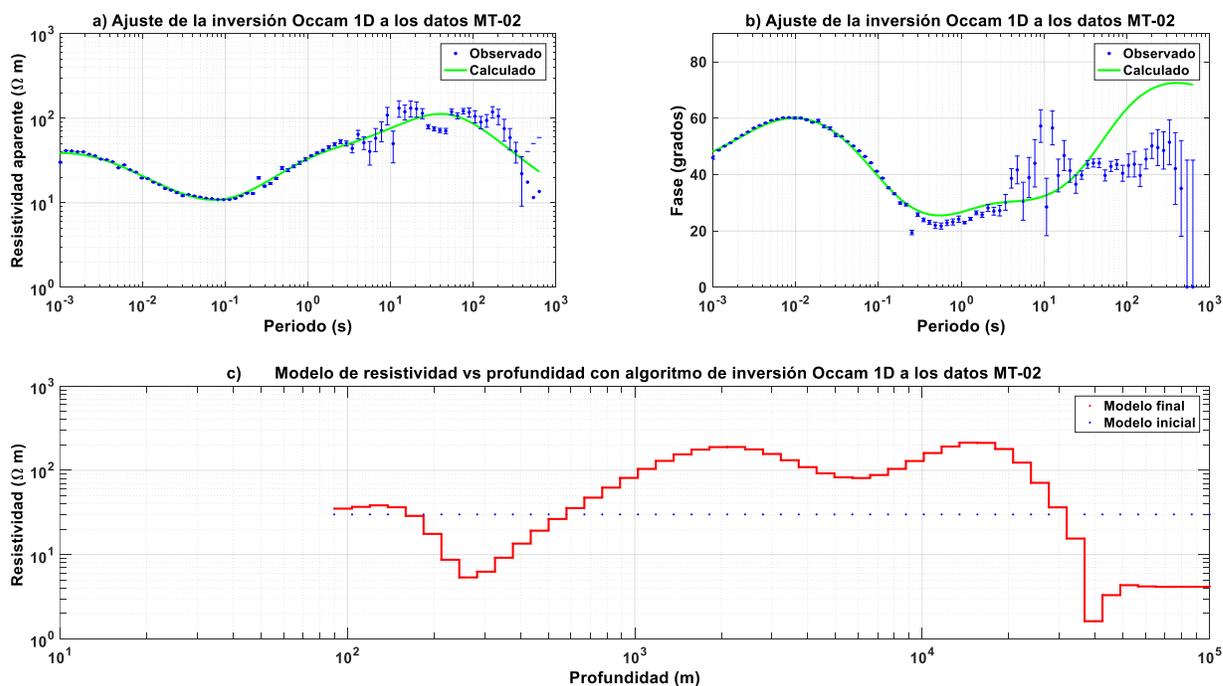


Figura 32. Modelo obtenido aplicando el algoritmo de inversión Occam 1D en el sitio MT-02. a) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de resistividad aparente observados. b) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de fase observados. c) Modelo obtenido de resistividad contra profundidad que describe el comportamiento de la resistividad en el subsuelo.

Debido a que, por un lado, el principal interés de este trabajo está enfocado en analizar el comportamiento de la resistividad del subsuelo en los primeros 2000 m de profundidad, y por otra parte, los datos observados tienen una menor dispersión en una banda de periodos entre 0.001 y 3 s, se realizó la inversión considerando solamente los datos en esta banda de periodos.

Para obtener el modelo de resistividades de los datos del sitio MT-01 comprendidos en la banda de periodos entre 0.001 y 3 s (Figura 33c), el programa de inversión realizó 20 iteraciones, después de la sexta iteración el modelo dejó de mejorar el ajuste, el rms final fue de 0.55. El ajuste es bueno para la resistividad aparente y en la fase solo ajusta en la banda de periodos de 0.001 y 0.01 s (Figura 33a y 33b).

Para el sitio MT-02 en la misma banda de periodos, el programa de inversión realizó 20 iteraciones, después de la cuarta iteración el modelo dejó de mejorar el ajuste, el rms final fue de 0.34. El ajuste es bueno tanto para la resistividad aparente como para la fase en la banda de periodos utilizada (Figura 34a y 34b).

Los datos del comportamiento de resistividad obtenidos de estos dos últimos modelos de inversión se tomaron de referencia para la discusión en el siguiente apartado.

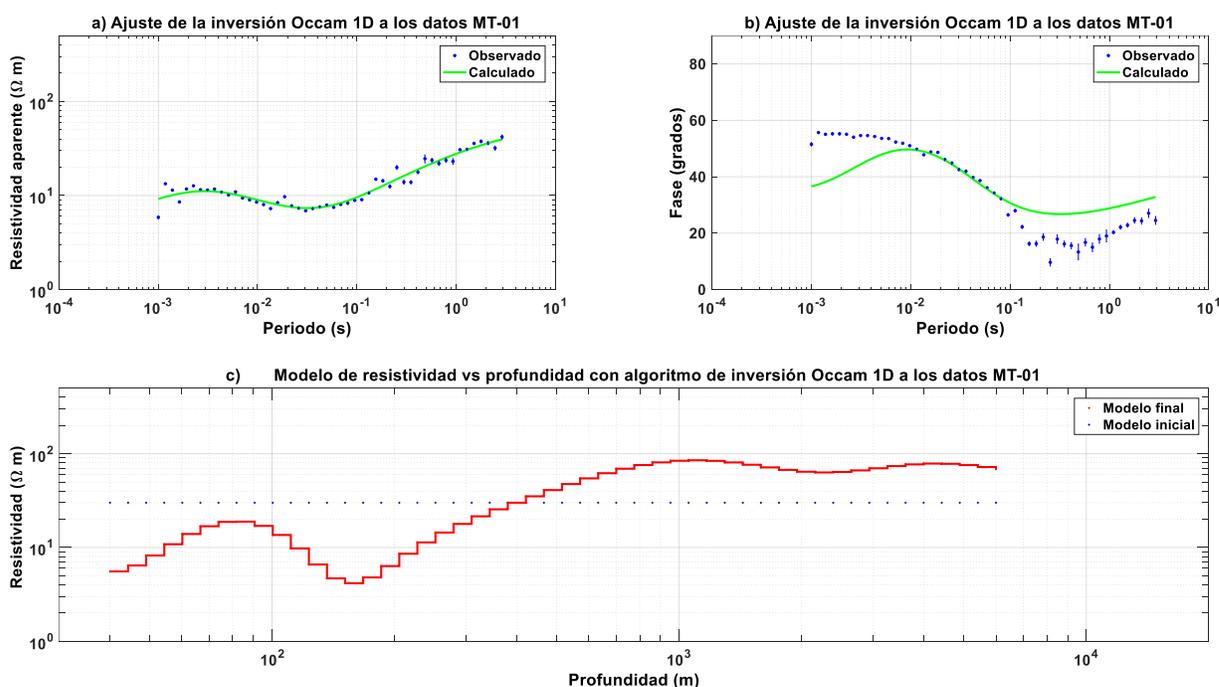


Figura 33. Modelo de inversión aplicando el algoritmo de Occam 1D en sitio MT-01 considerando solamente datos con frecuencias entre 1000 Hz y 0.3430 Hz. a) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de resistividad aparente seleccionados. b) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de fase seleccionados. c) Modelo obtenido de resistividad contra profundidad que describe el comportamiento de la resistividad en el subsuelo.

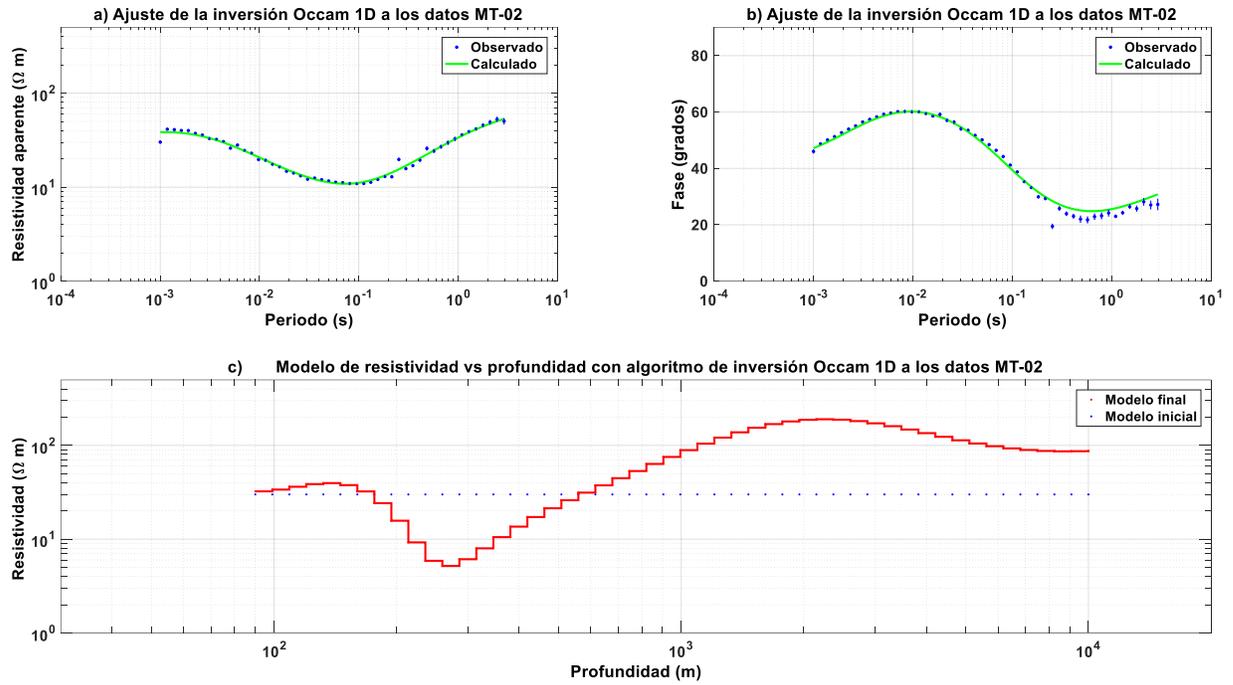


Figura 34. Modelo de inversión aplicando el algoritmo de Occam 1D en sitio MT-02 considerando solamente datos con frecuencias entre 1000 Hz y 0.3430 Hz. a) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de resistividad aparente seleccionados. b) Línea de ajuste (en color verde) sobre los datos de fase seleccionados. c) Modelo obtenido de resistividad contra profundidad que describe el comportamiento de la resistividad en el subsuelo.

4.2 Discusión

4.2.1 Comparación de resultados de los modelos térmicos y los modelos de resistividades eléctricas.

Los modelos térmicos EAC1 T650 K1 y EAC2 T750 K4 presentan las curvas de temperaturas simuladas con el mejor ajuste con respecto a las temperaturas registradas en cada uno de los pozos exploratorios (Figura 35), por tal razón se consideraron como referencia para realizar las comparaciones presentadas en este capítulo, en los gráficos también se indican las unidades litológicas reportadas para ambos pozos.

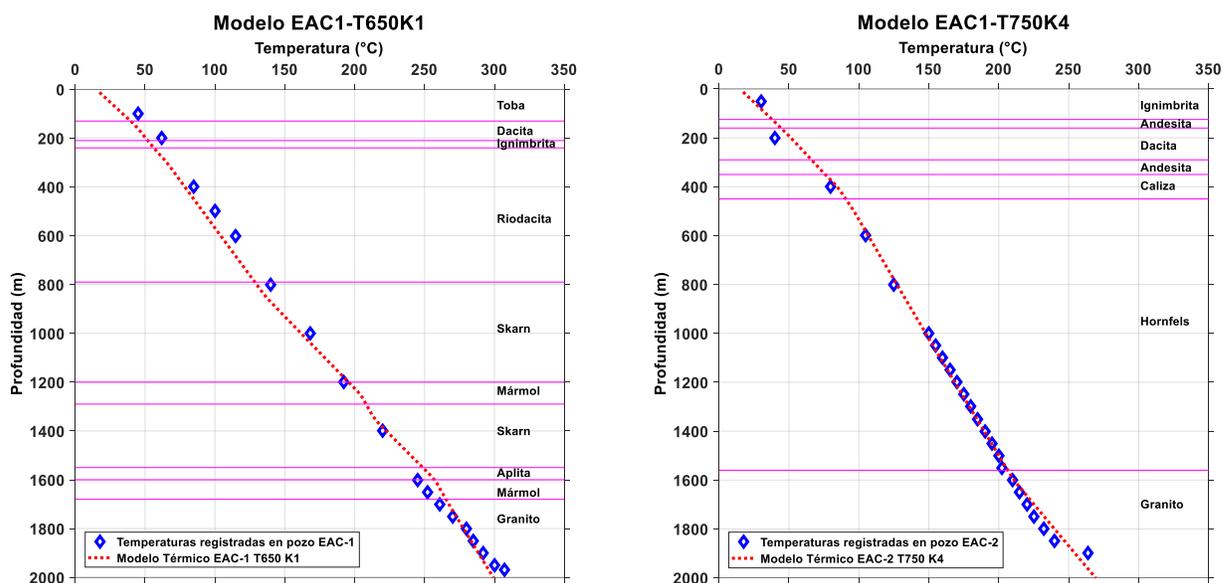


Figura 35. Modelos térmicos obtenidos para cada pozo con el mejor ajuste entre las temperaturas modeladas (marcadores rojos) y los datos registrados en los pozos (marcadores azules), las líneas horizontales magenta señalan los cambios en la litología.

Los valores de las conductividades térmicas k propuestos para las unidades litológicas del modelo térmico EAC-1 T650 K1 (Figura 36), presentan cierta correspondencia con la presencia de los minerales de alteración hidrotermal reportados por López-Hernández (2009). Para los primeros 800 m del pozo se tienen porcentajes de alteración de 40 a 100%, en esta zona los valores de k utilizados fueron menores de 2.1 W/mK; mientras que en las profundidades mayores a 1550 m donde los minerales de alteración disminuyen hasta niveles del 10%, los valores de k utilizados fueron mayores a 2.5 W/mK. En las zonas de skarn donde se reporta una abundancia moderada de cuarzo el valor de k usado fue de 1.6 W/mK.

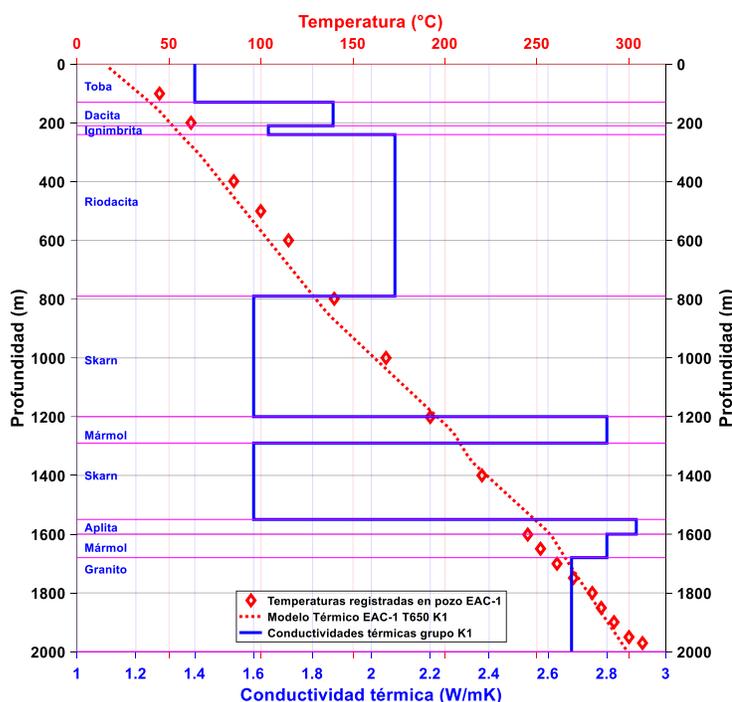


Figura 36. Modelo térmico EAC-1 T650K1 con el valor de la conductividad térmica asignada a cada unidad litológica.

En la curva de resistividad eléctrica contra profundidad (Figura 37) se observa que entre los 70 y 90 m de profundidad los valores de resistividad estimados están entre 15 y 20 Ωm . A una profundidad comprendida entre 100 y 200 m podemos sugerir la presencia de una zona conductora con valores estimados de resistividad entre 3 y 5 Ωm ; si bien la arcilla conductora, producto de la alteración hidrotermal, es la causa más común de baja resistividades (Ussher *et al.*, 2000), no todas las anomalías conductivas son capas de arcilla (Cumming, 2009), en este caso, para profundidades entre 175 y 780 m López-Hernández (2009) reporta una zona con alta intensidad de alteración conformada por los minerales esmectita, illita, cuarzo y calcita que se considera como la responsable de la baja resistividad. Cercano a la profundidad de 800 m la resistividad aumenta en el rango de 60 y 80 Ωm . A una mayor profundidad, la zona comprendida entre 2 y 3 km de profundidad presenta una disminución en la resistividad eléctrica. Normalmente se dice que cuando la temperatura incrementa, la resistividad eléctrica disminuye (Charré-Meza *et al.*, 2000), esto se debe a que aumenta la salinidad del fluido contenido en la roca. Es posible que esta zona más profunda y medianamente conductora (60-90 Ωm) resulte de interés geotérmico, lo que hace indispensable validar esa disminución en la resistividad eléctrica

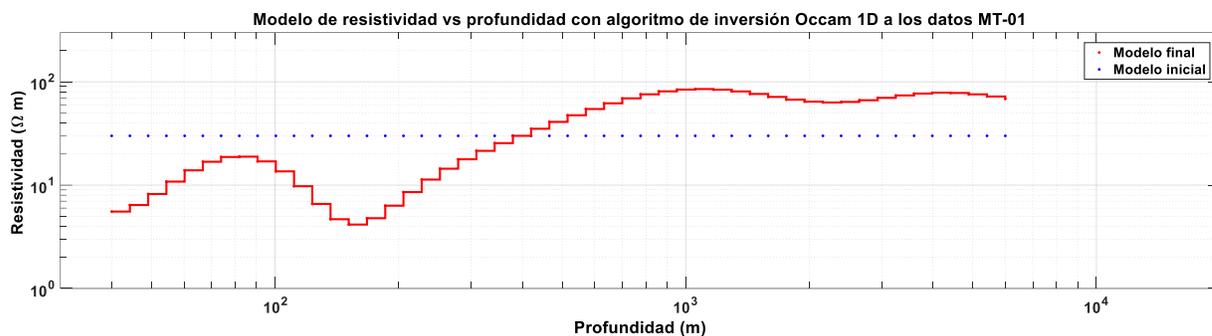


Figura 37. Curva de resistividad vs profundidad obtenida por inversión Occam 1D para el sitio MT-01.

Se usó un método adicional para estimar la resistividad del subsuelo y tener mayor certeza de la presencia de la zona conductora profunda presente después de los primeros 1000 metros. Con este propósito se utilizó la metodología desarrollada por Gomez-Treviño (1996), la cual permite estimar promedios de resistividades del subsuelo en medios 1D. Este método estima el promedio y la varianza de la resistividad del subsuelo a partir de los datos de resistividad aparente. Para estimar la resistividad promedio a cierta profundidad el método requiere dos valores de resistividad aparente a dos periodos distintos. Mientras más separados estén los periodos, mayor será el intervalo de profundidad representado por el valor promedio de resistividad que se obtiene. Se pueden tomar pares de datos a lo largo de las curvas de resistividad aparente y obtener estimaciones de resistividad del subsuelo (promedio y varianza) a distintas profundidades.

En la Figura 38, se muestran las estimaciones promedio obtenidas utilizando resistividades aparentes con distintas separaciones entre periodos, esto permite observar mejor el comportamiento de la curva de resistividad vs profundidad que resulta de este proceso. En una profundidad comprendida entre 1 y 4 km se puede notar que las curvas tienen un descenso en el conjunto de promedios de la resistividad, lo que coincide con el resultado de la inversión tipo Occam (Figura 39). Esto permite dar mayor confianza para concluir que la presencia de un conductor a esa profundidad es muy probable.

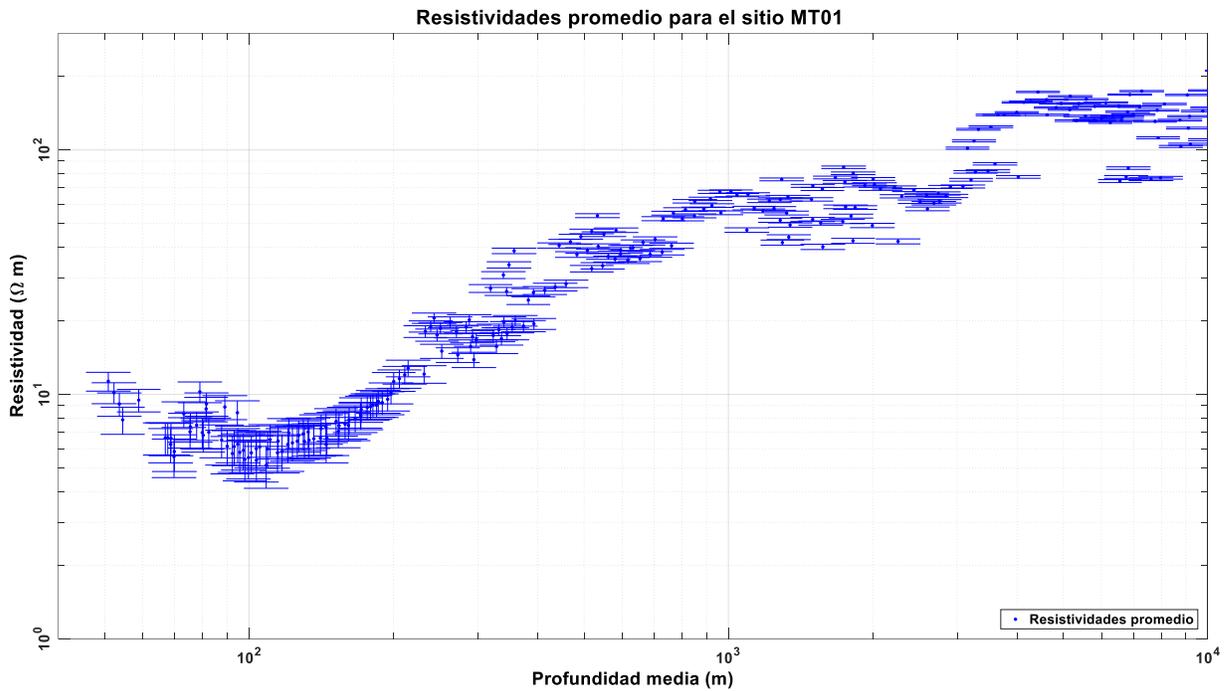


Figura 38. Conjunto de estimaciones promedio utilizando resistividades aparentes obtenidas con la metodología de Gómez-Treviño (1996), para el sitio MT-01.

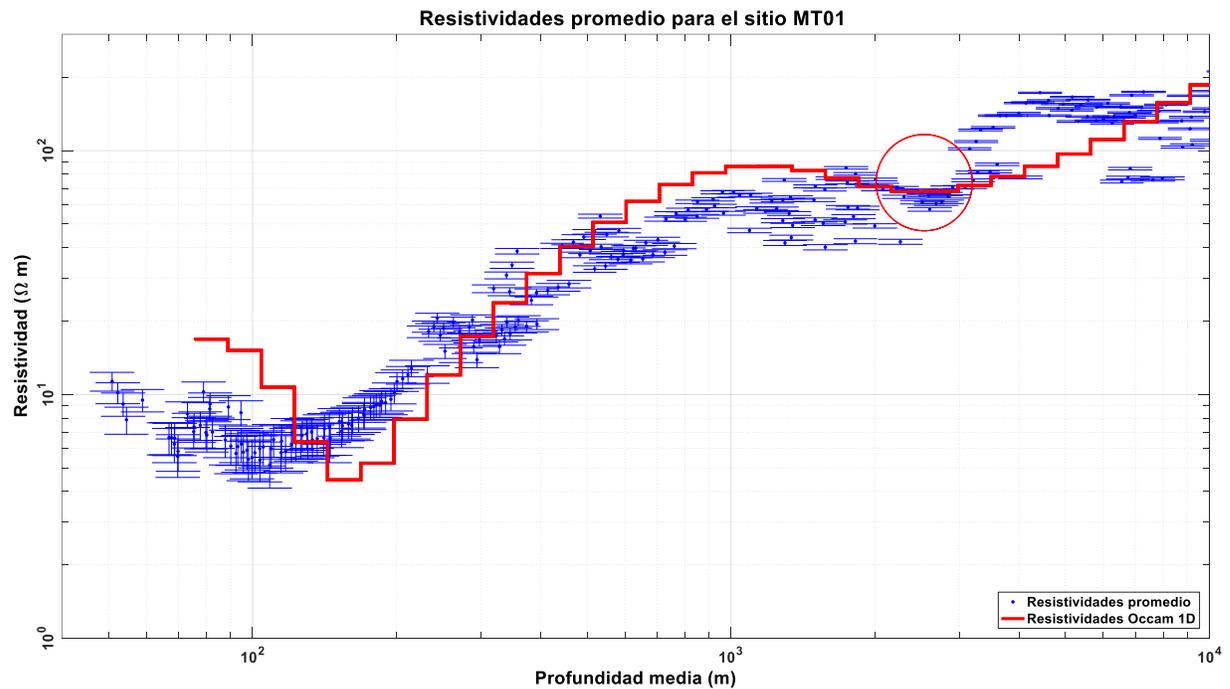


Figura 39 Conjunto de estimaciones promedio utilizando resistividades aparentes con distintas separaciones obtenidas con la metodología de Gómez-Treviño (1996) y comparadas con el modelo de inversión tipo Occam para el sitio MT01. Con el círculo rojo se indica el descenso en la resistividad detectado por ambos métodos.

4.2.1.1 Comparación de resultados en el pozo EAC-1

Al comparar el comportamiento de las temperaturas registradas en el pozo EAC-1 con la curva de temperaturas obtenidas del modelo térmico EAC1 T650 K1, así como con la curva de resistividades eléctricas obtenidas mediante la inversión de Occam con los datos del sitio MT-01 (Figura 40), se observa que la resistividad eléctrica presenta valores pequeños ($\sim 5 \Omega m$) en la zona entre los 100 y 200 m de profundidad, en donde se tienen reportada la unidad litológica de dacita, la temperatura medida en pozo para esa zona corresponde a $\sim 45^\circ C$; se mencionó anteriormente que la alteración hidrotermal es muy intensa en esa zona y es la causa más probable de la baja resistividad. En la zona con profundidad cercana a 1100 m, donde se reporta la unidad litológica de skarn, se observa un incremento en la resistividad hasta alcanzar un valor máximo cercano a $85 \Omega m$ con una temperatura registrada en pozo de $\sim 168^\circ C$. Entre los 1500 y 3000 m de profundidad la resistividad eléctrica presenta una zona conductora, que se validó por el método de estimación de promedios de resistividades de Gomez-Treviño (1996), los registros de pozo a profundidades mayores de 1500 m y hasta 2000 m indican temperaturas en un rango de 245 a $307^\circ C$.

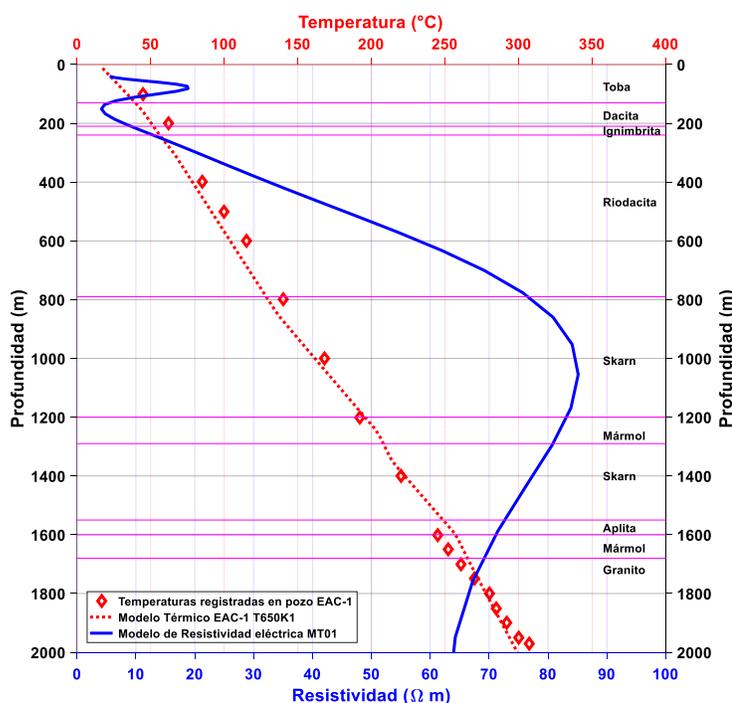


Figura 40 Modelo térmico EAC-1 T650K1 comparado con el comportamiento del valor de la conductividad eléctrica obtenida con la inversión tipo Occam 1D de los datos del sitio MT01.

En general la salinidad y la alteración por minerales de arcilla, junto con las altas temperaturas asociadas con la actividad geotérmica tienden a dar resultados de resistividades bajas en los sistemas geotérmicos (Ussher *et al.*, 2000).

La comparación del comportamiento de las conductividades térmicas con las conductividades eléctricas, en este sitio, no muestra una correlación bien definida. (Figura 41).

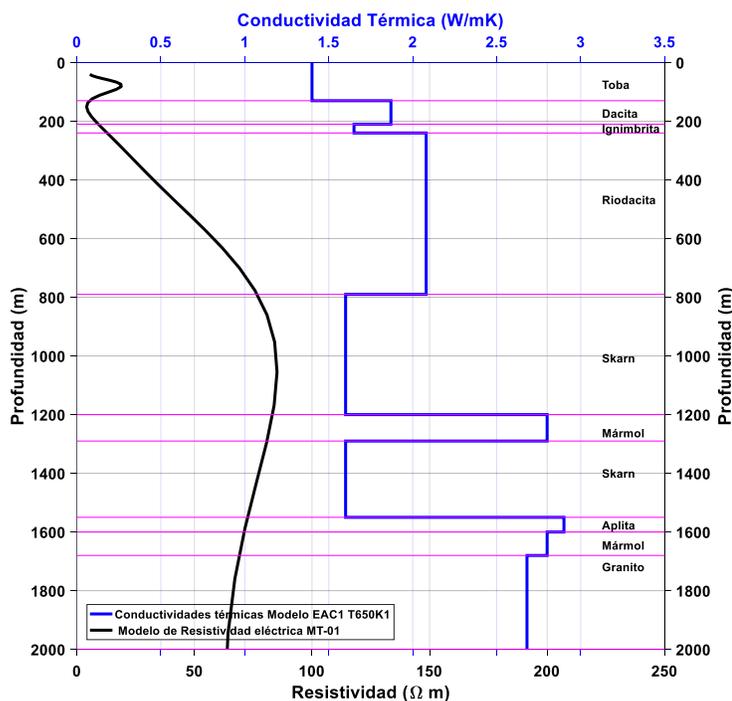


Figura 41 Comportamiento de los valores de las conductividades térmicas propuestas para el modelo EAC1 T650 K1 comparado con el comportamiento del valor de la conductividad eléctrica obtenida con la inversión tipo Occam 1D para los datos del sitio MT-01.

4.2.1.2 Comparación de resultados en el pozo EAC-2

Los valores de las conductividades térmicas k propuestos para las unidades litológicas del modelo térmico EAC-2 T750 K4 se muestran en la Figura 42. El porcentaje de alteración total por minerales en la columna estratigráfica reportada por Viggiano-Guerra *et al.*, (2011) es de 50% al 100% hasta una profundidad aproximada de 600 m, para esa misma profundidad, los valores de k presentaron variaciones entre 1.65 y 3.00 W/mK. A profundidades comprendidas entre 600 y 1500 m, la alteración total se reduce a porcentajes entre 25 y 50% y el valor propuesto de k , se mantiene en 3.00 W/mK. En profundidades mayores a 1500 m, la alteración total se reduce a menos del 25%; el valor de k propuesto también disminuye a 2.20 W/mK.

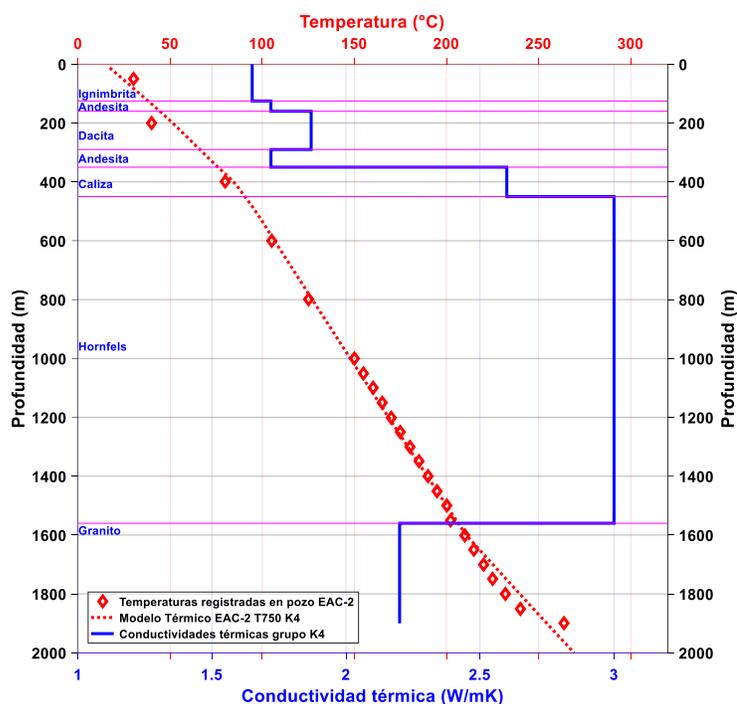


Figura 42. Modelo térmico EAC2 T750 K4 comparado con el comportamiento del valor de la conductividad térmica asignada a cada unidad litológica.

Al analizar la curva de resistividad contra profundidad correspondiente a la inversión de datos del sitio MT-02 (Figura 43) se observa un comportamiento semejante al del sitio MT-01. La curva comienza con resistividades cercanas a $40 \Omega m$ entre 100 y 150 m de profundidad para después indicar una baja resistividad estimada en $5 \Omega m$ a una profundidad entre 250 y 300 m, asociado probablemente a la alteración por minerales hidrotermales, para después aumentar su resistividad hasta un valor comprendido alrededor de $200 \Omega m$, a una profundidad entre 1.9 y 2.3 km. También esta curva muestra un descenso en la resistividad después de los 2.3 km de profundidad, lo que podría indicar la presencia de un conductor a profundidad, por lo cual nuevamente surge la necesidad de validar la curva obtenida por inversión de Occam 1D con la metodología de Gómez-Treviño (1996) (Figura 44).

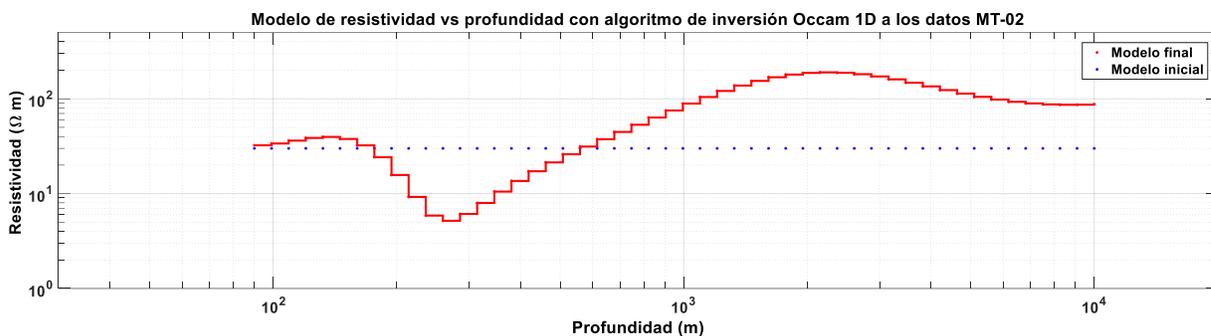


Figura 43. Curva de resistividad vs profundidad obtenida con la inversión Occam 1D para el sitio MT-02.

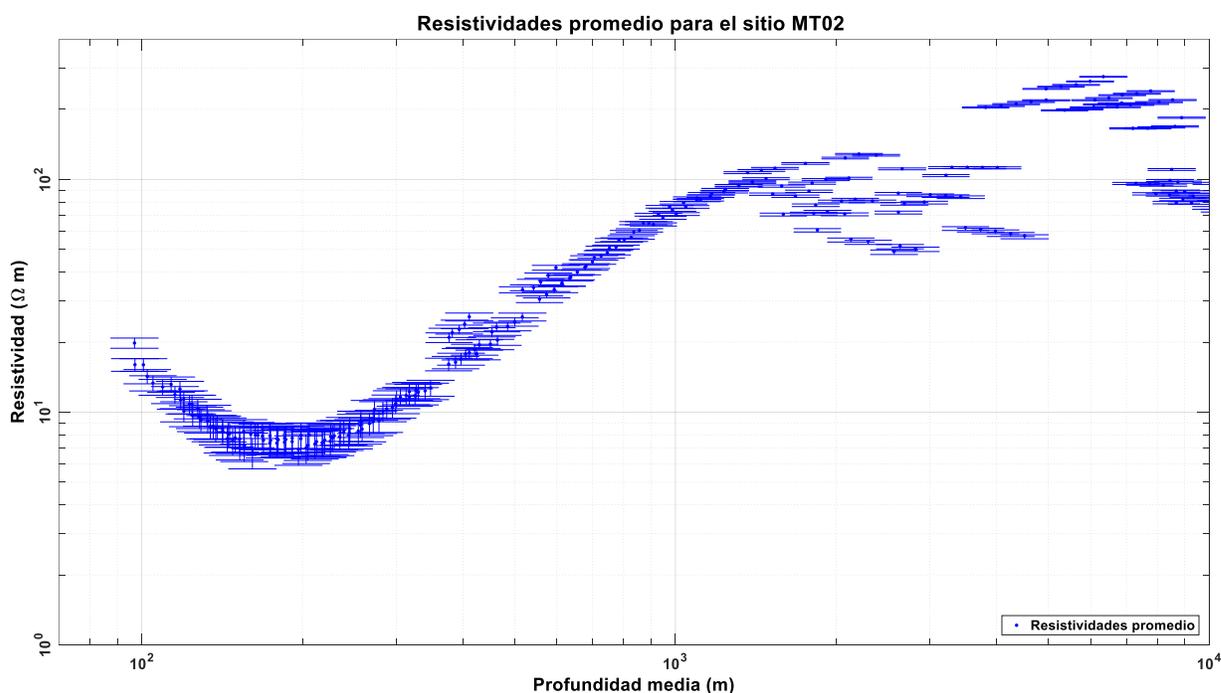


Figura 44. Conjunto de estimaciones promedio utilizando resistividades aparentes con distintas separaciones obtenidas con la metodología de Gómez-Treviño (1996), para el sitio MT-02.

La figura 45 muestra que el modelo obtenido con la inversión de Occam para el sitio MT-02 es consistente con los promedios de resistividad que se obtienen con el método de Gómez-Treviño. Sin embargo para este caso solo se observa el conductor más somero y no hay consistencia para una zona conductora profunda, a diferencia de los resultados del sitio MT-01.

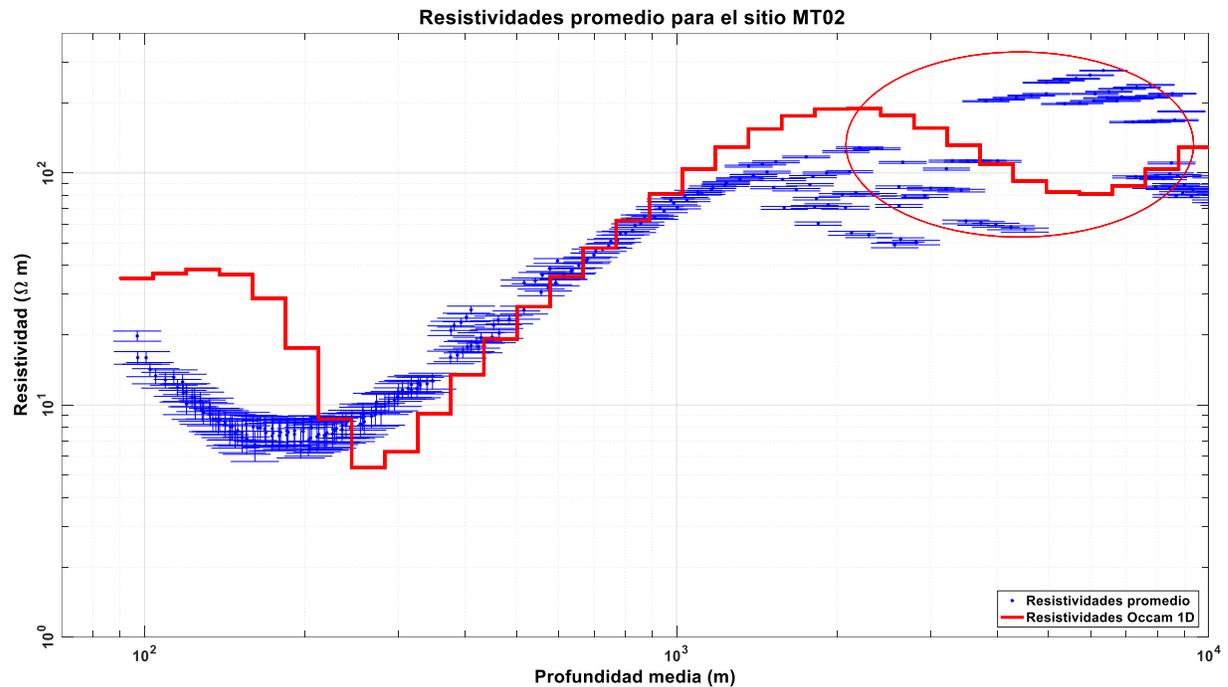


Figura 45 Conjunto de promedios de resistividades obtenidos con la metodología de Gómez-Treviño (1996) y comparadas con el modelo de inversión tipo Occam para el sitio MT-02. El óvalo señala la zona en la cual las resistividades promedio no presentan un comportamiento consistente con la inversión de Occam.

La Figura 46 muestra la comparación que corresponde al comportamiento de las curvas de temperatura registradas en el pozo EAC-2 con las curvas de temperaturas obtenidas de los modelos, así como con las curvas de resistividad eléctrica del sitio MT-02. Se muestra un bajo resistivo somero en la zona donde se encuentran las primeras 5 unidades litológicas y en donde se reporta alteración hasta del 100% por minerales hidrotermales, a esas profundidades las temperaturas de registro de pozo indican valores entre 40 y 105°C. La resistividad en las unidades del hornfels y el granito se incrementa hasta valores cercanos a 200 Ωm , este incremento en la resistividad puede estar asociado al bajo nivel de alteración reportado en esas unidades litológicas. El incremento en la temperatura reportado en los registros de pozo para profundidades de 600 a 1900 m, abarca un rango entre 105 y 263 °C

Al comparar el comportamiento de las conductividades térmicas con las conductividades eléctricas, en este sitio, se observa que el descenso en la resistividad eléctrica está en la zona con mayor cambio en la litología y en consecuencia con mayor cambio en las conductividades térmicas presentes, destaca además que la zona conductora a profundidad no pudo validarse, como en el sitio anterior y que la resistividad eléctrica presenta un continuo incremento en su valor, donde las conductividades térmicas presentan valores mayores a 2.00 W / mK (Figura 47).

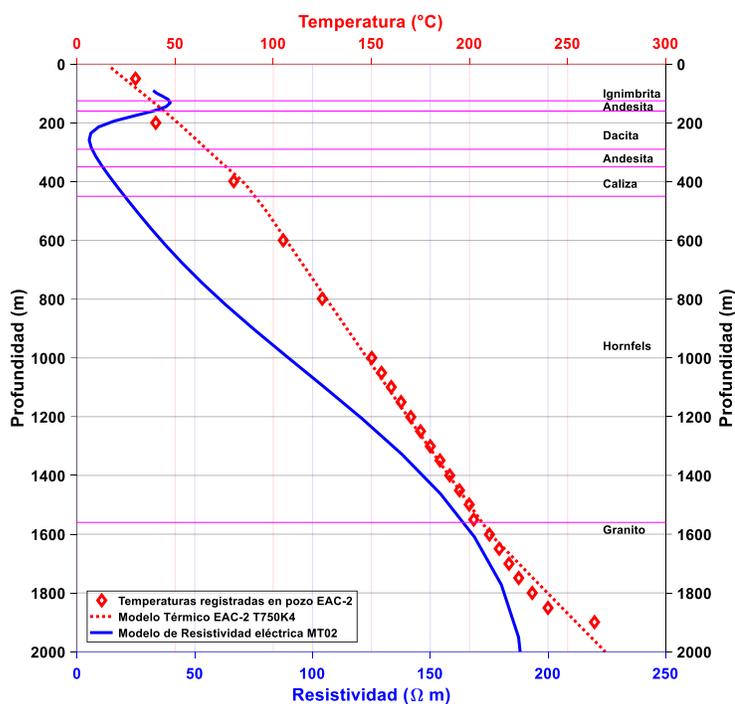


Figura 46. Modelo térmico EAC2 T750K4 comparado con el comportamiento del valor de la resistividad eléctrica obtenida de la inversión tipo Occam 1D de los datos del sitio MT-02.

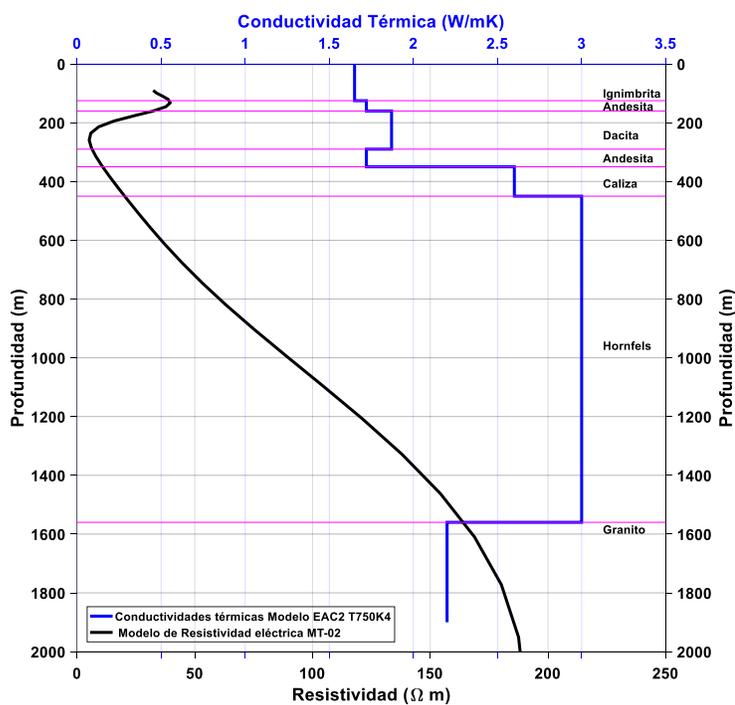


Figura 47. Comportamiento de los valores de las conductividades térmicas propuestas para el modelo EAC2 T750K4 comparado con el comportamiento del valor de la resistividad eléctrica obtenida de la inversión tipo Occam 1D para los datos del sitio MT-02.

5. Conclusiones y recomendaciones.

La información reportada en la literatura correspondiente a las características termofísicas del sistema geotérmico de Tulancingo-Acozulco es, hasta el momento escasa, considerando un enfoque de posible desarrollo como EGS. Debido a ello, es necesario contribuir con información que permita alcanzar una mejor visión y comprensión de los fenómenos de interés geotérmico presentes en el sistema.

Se realizaron 32 modelos térmicos, conductivos en 1D en los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2. Los valores de las conductividades térmicas fueron tomados de la literatura y se propusieron 4 modelos de conductividades para cada pozo exploratorio. Las temperaturas propuestas en las bases de los modelos fueron de 600 °C a 750°C en intervalos de 50°C, con lo cual se tienen 4 temperaturas en la base del modelo que en combinación con los modelos de conductividades permitieron el desarrollo de 16 modelos térmicos en 1D en cada pozo exploratorio, para simular los perfiles de temperaturas registrados y reportados en la literatura en ambos pozos. Para estos modelos térmicos, los valores de las propiedades termofísicas de las rocas que se usaron no fueron estrictamente los de las unidades de roca reportadas en las columnas litológicas de los pozos, sin embargo se tomaron a partir de los diferentes valores reportados en la literatura (Anexo A). El acceso a los núcleos de perforación para realizar mediciones en laboratorio de las propiedades termofísicas de las rocas, permitiría conocer el margen de error entre los valores reales y los valores propuestos en los modelos.

La evaluación del comportamiento del campo de temperaturas en ambos pozos, señala la existencia de energía suficiente para ser extraída en profundidades consideradas como explotables en la mayoría de los modelos conceptuales de los sistemas geotérmicos. Sin embargo, es necesario contar con más datos como mediciones de flujo de calor o temperaturas estabilizadas para llevar los modelos térmicos a 2D y 3D y así poder considerar además posibles reservas energéticas del sistema.

El modelo de resistividad eléctrica contra profundidad del sitio MT-01 en el pozo EAC-1, presenta una zona conductora a una profundidad comprendida entre 100 y 200 m con valores entre 3 y 5 Ωm posiblemente asociada a una alta intensidad de alteración por actividad hidrotermal. Presenta también una segunda zona a profundidad entre 1500 y 3000 m con una disminución en la resistividad que sugiere una relación con un incremento en la permeabilidad y posible presencia de fluidos.

El modelo de resistividad eléctrica contra profundidad del sitio MT-02 en el pozo EAC-2, presentó una zona conductora estimada en 5 Ωm a una profundidad entre 200 y 300 m que se sugiere como la zona asociada

a la presencia de alteración por minerales hidrotermales. Los valores más altos de resistividad para este modelo ($200 \Omega m$) se ubican a una profundidad cercana a los 2 km.

Es necesario coordinar adecuadamente el trabajo de obtención de datos MT en campo, con la intención de realizar mediciones sincronizadas que permitan el procesamiento de datos usando referencia remota.

La comparación del comportamiento de los valores de las conductividades térmicas usados en los modelos térmicos con la resistividad eléctrica obtenida de los modelos de inversión, no indica alguna correlación bien definida que permita asociar los cambios de la conductividad térmica con los correspondientes cambios de la conductividad eléctrica.

Literatura citada

- Arango-Galván, C., Guzmán-Cortés, A., y Canet-Miquel, C. (2013). Estudio magnetoteléurico de una porción de la caldera de Acoculco, Puebla. In *GEOS* (Vol. 33, p. 36).
- Berdichevsky, M. N. (1960). Electrical prospecting with the method of telluric currents. *Gostoptechizdat, Moscow*, 237.
- Blackwell, D. D., y Steele, J. L. (1989). Thermal conductivity of sedimentary rocks: measurement and significance. *Thermal History of Sedimentary Basins*, 13–37. http://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0_2
- Bostick, F. X. (1977). A simple almost exact method of MT analysis. In *Workshop on electrical methods in geothermal exploration* (pp. 175–177).
- Cagniard, L. (1953). BASIC THEORY OF THE MAGNETO-TELLURIC METHOD OF GEOPHYSICAL PROSPECTING. *GEOPHYSICS*, 18(3), 605–635. <http://doi.org/10.1190/1.1437915>
- Canet, C., Trillaud, F., Prol-Ledesma, R. M., González-Hernández, G., Peláez, B., Hernández-Cruz, B., y Sánchez-Córdova, M. M. (2015). Thermal history of the Acoculco geothermal system, eastern Mexico: Insights from numerical modeling and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 56–62. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.019>
- Cantwell, T. (1960). *Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signals*. Massachusetts Institute of Technology. Retrieved from <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/58255>
- Cebula, A., y Taler, D. (2014). Finite Volume Method in Heat Conduction. In R. B. Hetnarski (Ed.), *Encyclopedia of Thermal Stresses* (pp. 1645–1658). Dordrecht: Springer Netherlands. http://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_896
- Cermak, V. y Rybach, L. (1982). Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In M. Beblo (Ed.), *Geophysics - Physical Properties of Rocks* (pp. 305–343). Springer.
- Cermak, V., Bodri, L., Rybach, L., y Buntebarth, G. (1990). Relationship between seismic velocity and heat production: comparison of two sets of data and test of validity. *Earth and Planetary Science Letters*, 99(1–2), 48–57. [http://doi.org/10.1016/0012-821X\(90\)90069-A](http://doi.org/10.1016/0012-821X(90)90069-A)
- Charré-Meza, A. S., Pérez-Flores, M. A., y Gómez-Treviño, E. (2000). 2-D INVERSION OF DC RESISTIVITY DATA FROM THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL AREA, MEXICO. In *proceedings world geothermal congress* (pp. 1037–1041).
- Chave, A. D., y Jones, A. G. (2012). *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. Cambridge University Press. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=holsCQPrtpYC&pgis=1>
- Constable, S. C., Parker, R. L., y Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *GEOPHYSICS*, 52(3), 289–300. <http://doi.org/10.1190/1.1442303>
- Cumming, W. (2009). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. In *PROCEEDINGS, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California*. Citeseer.
- Diment, W. H., y Pratt, H. R. (1988). Thermal Conductivity of Some Rock-Forming Minerals : A Tabulation. *USGS Report*, 16.

- Emerson, D. W. (1986). Physical properties of skarns. *Exploration Geophysics*, 17(4), 201–212. Retrieved from <https://doi.org/10.1071/EG986201>
- Eppelbaum, L., Kutasov, I., y Pilchin, A. (2014). *Applied Geothermics. Applied Geothermics*. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-34023-9>
- Gómez-Treviño, E. (1996). Approximate depth averages of electrical conductivity from surface magnetotelluric data. *Geophysical Journal International*, 127(3), 762–772. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb04055.x>
- Grirate, H., Zari, N., Elamrani, I., Couturier, R., Elmchaouri, A., Belcadi, S., y Tochon, P. (2013). Characterization of several Moroccan rocks used as filler material for thermal energy storage in CSP power plants. *Energy Procedia*, 49, 810–819. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.088>
- Lermo, J., Antayhua, Y., Bernal, I., Venegas, S., y Arredondo, J. (2009). Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acoculco, Pue., México. *Geotermia*, 22(1), 40–58.
- López-Hernández, A. (2009). Evolución Volcánica del Complejo Tulancingo-Acoculco y su sistema Hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México: Mexico DF, Mexico, Universidad Nacional Autónoma de México. PhD thesis.
- López-Hernández, A., y Castillo-Hernandez, D. (1997). Exploratory drilling at Acoculco, Puebla, Mexico: A hydrothermal system with only nonthermal manifestations. *Geothermal Resources Council Transactions*, 21, 429–433.
- López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., y Quijano-León, J. L. (2009). Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acoculco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies. *Geothermics*, 38(3), 279–293. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.05.001>
- Lorenzo-Pulido, C., y Flores-Armenta, Magaly, Ramírez-Silva, G. (2010). Characterization of the Acoculco Geothermal Zone as a HDR System, 34, 2–5.
- Macías, J. L. (2017). *Exploración geotérmica del complejo volcánico de Cerritos Colorados, Jal. y La Reforma, B. C. S. Estudios de Vulcanología, estratigrafía, geoquímica y petrografía experimental, Informe P15 CeMIE-Geo*.
- Moukalled, F., Mangani, L., y Darwish, M. (2015). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab* (Vol. 113). Springer.
- Nixon, G. T. (1982). The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 93(6), 514–523. [http://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<514:TRBQVI>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<514:TRBQVI>2.0.CO;2)
- Pasquale, V., Gola, G., Chiozzi, P., y Verdoya, M. (2011). Thermophysical properties of the Po Basin rocks. *Geophysical Journal International*, 186(1), 69–81. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05040.x>
- Peiffer, L., Bernard-Romero, R., Mazot, a., Taran, Y. a., Guevara, M., y Santoyo, E. (2014). Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO₂–CH₄–H₂S) at a promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Acoculco caldera, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 284(August 2015), 122–137. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.019>
- Reiter, M., y Tovar R., J. C. (1982). Estimates of terrestrial heat flow in northern Chihuahua, Mexico, based upon petroleum bottom-hole temperatures. *Geological Society of America Bulletin*, 93(7), 613–624. [http://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<613:EOTHFI>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<613:EOTHFI>2.0.CO;2)

- Robertson, E. C. (1988). Thermal Properties of Rocks. *US Department of the Interior: Geological Survey*, 88–441.
- Rybach, L., y Bunterbarth, G. (1982). Relationships between the petrophysical properties density, seismic velocity, heat generation, and mineralogical constitution. *Earth and Planetary Science Letters*, 57(2), 367–376. [http://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90157-1](http://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90157-1)
- Shim, B. O., Park, J. M., Kim, H. C., y Lee, Y. (2010). Statistical Analysis on the Thermal Conductivity of Rocks in the Republic of Korea. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, (92), 0–1.
- Steiger, M., Charter, A., y Siegesmund, S. (2014). *Stone in Architecture*. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2>
- Stimac, J. A., Goff, F., y Wohletz, K. (2001). Thermal modeling of the Clear Lake magmatic-hydrothermal system, California, USA. *Geothermics*, 30(2–3), 349–390. [http://doi.org/10.1016/S0375-6505\(00\)00062-6](http://doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00062-6)
- Thomas, J., Frost, R., y Harvey, R. D. (1973). Thermal Conductivity of Carbonate Rocks. *Engineering Geology*, 7, 3–12.
- Tikhonov, A. (1950). On Determining Electrical Characteristics of the Deep Layers of the Earth's Crust. *Doklady Akademii Nauk*, 73(2), 295–297.
- Ussher, G., Harvey, C., Johnstone, R., y Anderson, E. (2000). Understanding the resistivities observed in geothermal systems. In *proceedings world geothermal congress* (pp. 1915–1920).
- Verma, S. P. (2000). Geochemical evidence for a lithospheric source for magmas from Los Humeros caldera, Puebla, Mexico. *Chemical Geology*, 164(1–2), 35–60. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00138-2](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00138-2)
- Verma, S. P. (2001). Geochemical evidence for a lithospheric source for magmas from Aocolulco caldera, eastern Mexican Volcanic Belt. *Actas INAGEQ*, 7(July), 35. <http://doi.org/10.2747/1938-2839.43.1.51>
- Verma, S. P., y Gómez-Arias, E. (2013). Three-dimensional thermal sensitivity analysis of cooling of a magma chamber in the Los Azufres geothermal field, Michoacán, Mexico. *Geothermal Energy*, 1(1), 5. <http://doi.org/10.1186/2195-9706-1-5>
- Versteeg, H. K., y Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=RvBZ-UMpGzIC>
- Viggiano-Guerra, J. C., Flores-Armenta, M., y Ramírez-Silva, G. R. (2011). Evolución del sistema geotérmico de Aocolulco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, 24(1), 14–24.
- Vilà, M., Fernández, M., y Jiménez-Munt, I. (2010). Radiogenic heat production variability of some common lithological groups and its significance to lithospheric thermal modeling. *Tectonophysics*, 490(3–4), 152–164. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.05.003>
- Vozoff, K. (1990). Magnetotellurics: Principles and practice. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Earth and Planetary Sciences*, 99(4), 441–471. <http://doi.org/10.1007/BF02840313>
- Ziagos, J. P., Blackwell, D. D., & Mooser, F. (1985). Heat flow in southern Mexico and the thermal effects of subduction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5410–5420. <http://doi.org/10.1029/JB090iB07p05410>

Anexos

Anexo A. Tabla de propiedades termofísicas de las unidades litológicas.

(Cermak y Rybach, 1982)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)		Densidad (kg/m ³)		Calor específico (J/kgK)			
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio		
Caliza	2.30	2.50	2.40		2700		890	
	1.90	3.10	2.60		2690			
	1.70	2.70	2.21		2600	820	950	850
			2.09		2750			800
	2.50	2.80	2.62					
			2.00					1000
			2.47					
	1.90	3.10	2.67					
	2.30	4.40	3.07			960	1720	1180
	2.50	3.10	2.86					
	2.00	2.60	2.37					
	0.90	2.60	1.81					
	1.30	3.30	2.26			840	1260	1000
	1.20	2.80	1.96					
	1.60	3.80	2.47					
	0.60	3.20	2.17					
			3.05					
			2.18					
	3.20	3.60	3.39					
	1.90	3.00	2.56					
	2.70	3.40	3.06					
			2.21					
			2.79					
	2.30	3.50	2.83			820	920	880
Andesita	1.60	2.50	1.97					
	2.30	2.70	2.51					
			3.21					
Toba	1.40	2.10	1.82		2640			
	2.70	4.40	3.45		2650	1000	1170	1090
			0.63		2440			

(Cermak y Rybach, 1982)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)		Densidad (kg/m ³)		Calor específico (J/kgK)			
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio		
Mármol	2.00	3.40	2.41		2690	670	920	800
	2.00	5.55	2.76					
	2.10	3.50						
			3.05					750
			2.86					
			2.79					
			2.43					
Granito			3.38		2620			
	2.60	3.80	3.25		2610			
	1.30	2.50	2.19		2650	670	800	750
			3.09		2640			860
	2.10	3.10	2.96			790	980	820
	2.50	4.00	3.10			810	960	880
			2.76					
			4.43					
	2.40	2.60	2.52					
	2.40	3.30	2.88			800	1090	960
	2.20	3.20	2.95					
	1.80	4.00	2.78			920	1550	1220
	1.40	3.60	2.51					
	2.20	2.90	2.53			880	1050	940
	1.70	3.40	2.47					
	2.70	3.50	2.98					
			3.73					
	2.70	3.30	2.92					
	2.70	3.10	2.85					
	2.00	2.90	2.47					
	2.70	4.50	3.57					
	2.90	4.10						
			2.62					
			2.61					
			2.16					
	1.60	2.80	2.36			880	1380	1130
Hornfels			6.07					1470
	3.00	3.40	3.22					
	4.40	4.80	4.61					
Skarn	1.80	3.10	2.43					
			2.72					

(Blackwell y Steele, 1989)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
	Rango		Promedio	Rango		Promedio	Rango		Promedio
Caliza	2.50	3.10							
Granito	2.50	3.35							
Andesita	1.45	2.10							
Toba	1.70	2.10							

(Reiter y Tovar, 1982)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Caliza	2.17	3.05	2.80						

(Grirate *et al.*, 2013)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Granito			2.80	2530	2620		600	1200	
Mármol			3.20	2610	2670				1470
Hornfels			1.50	2400	2800		700	900	

(Shim *et al.*, 2010)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Granito	1.82	7.71	3.33						
Andesita	2.04	5.81	2.80						
Toba	1.77	4.56	2.95						
Riolita	2.62	5.02	3.51						
Hornfels	2.61	6.71	3.46						
Caliza	2.25	6.84	3.83						

(Eppelbaum *et al.*, 2014)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Caliza	2.50	3.00				2600			840
			2.37			2700			851
			3.44			2714			890
Granito			2.68						790
			3.07						950
Andesita			1.87						
			2.26						

(Steiger *et al.*, 2014)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Caliza	0.76	0.83				2180			
	0.78	1.23				2600			
Riolita	0.73	3.13		2460	2750				
Granito	1.34	3.69		2550	2750				
Mármol	1.59	4.00		2640	2820				
Toba						2010			
						1510			
						2710			

(Vilà *et al.*, 2010)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Andesita						2650			
Granito						2650			

(Cermak *et al.*, 1990)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Aplita						2580			
						2610			
Granito	2.57	2.69							

(Rybach y Bunterbarth, 1982)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Granito				2570	2690				

(Robertson, 1988)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Granito									770
Marmol									850
									930
Caliza									1000
									830

(Verma y Gómez-Arias, 2013)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Granito			2.80			2680			1073
Andesita			1.72			2180			1151
Riolita			3.44			2460			1074

(Diment y Pratt, 1988)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Mármol			2.78			2690			
			2.83						
Caliza			2.29			2690			
			3.27			2610			
			2.73			2700			
			2.76						
			2.84						

(Pasquale *et al.*, 2011)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Dacita	3.56	3.91	3.73	2690	2500	2610			

(Canet *et al.*, 2015)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Ignimbrita			1.65			2341			840
Toba			1.65			2295			840
Dacita			1.87			2290			840
Mármol			2.37			2359			890
Granito			2.68			2761			950

(Thomas *et al.*, 1973)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Caliza			3.00			2.71			
			2.90			2.68			
			2.50						
			2.40						

(Stimac *et al.*, 2001)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Andesita	1.21	2.14	1.68						
Dacita	1.59	1.80	1.68						
Riolita	0.75	1.80	1.09						

(Emerson, 1986)

Roca	Conductividad térmica (W/mK)			Densidad (kg/m ³)			Calor específico (J/kgK)		
Skarn	2.10	2.70				3190			
	1.30	7.40				3560			
	2.90	4.90				3040			
	3.70	7.00				4510			
	2.10	3.70				3500			
	1.10	1.60				3200			
						3210			
						3170			
						3310			
Hornfels			1.50			2820			
	1.40	2.10				3240			
						3110			
Mármol	1.60	2.80	2.20			2840			
	4.00	5.20				2710			
						2700			
						2780			
Caliza						2710			

Anexo B

Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados en los modelos térmicos.

Modelo térmico EAC-1 T 600									
Pozo EAC-1		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
100	45	34.7	22.9	31.1	30.8	31.6	29.8	30.6	32.0
200	62	49.4	20.3	43.2	30.3	43.5	29.8	42.3	31.8
400	85	75.1	11.7	64.2	24.4	64.1	24.6	63.6	25.2
500	100	86.9	13.1	74.0	26.0	73.5	26.5	73.9	26.1
600	115	98.8	14.1	83.7	27.2	83.0	27.9	84.2	26.8
800	140	122.6	12.5	103.2	26.3	101.9	27.2	104.9	25.1
1000	168	152.4	9.3	127.8	23.9	124.5	25.9	131.9	21.5
1200	192	183.8	4.3	153.7	19.9	148.2	22.8	160.6	16.3
1400	220	208.7	5.1	175.3	20.3	169.7	22.9	182.3	17.2
1600	245	240.0	2.1	201.7	17.7	196.6	19.7	207.9	15.1
1650	252	244.5	3.0	207.2	17.8	202.3	19.7	213.3	15.4
1700	261	249.2	4.5	213.0	18.4	208.2	20.2	219.0	16.1
1750	270	254.0	5.9	218.2	19.2	213.5	20.9	224.0	17.0
1800	280	258.9	7.5	223.4	20.2	218.8	21.9	229.1	18.2
1850	285	263.8	7.4	228.6	19.8	224.1	21.4	234.2	17.8
1900	292	268.7	8.0	233.9	19.9	229.5	21.4	239.3	18.0
1950	300	273.6	8.8	239.2	20.3	234.9	21.7	244.5	18.5
1970	307	276.1	10.1	241.8	21.3	237.6	22.7	247.0	19.6
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			170.6		403.7		427.0		377.9
Ajuste Promedio			9.5%		22.4%		23.7%		21.0%

Modelo térmico EAC-1 T 650									
Pozo EAC-1		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
100	45	36.3	19.3	32.4	27.9	32.9	26.9	31.8	29.2
200	62	52.3	15.7	45.5	26.6	45.9	26.0	44.5	28.3
400	85	80.0	5.8	68.2	19.7	68.0	19.9	67.5	20.6
500	100	92.8	7.2	78.7	21.3	78.2	21.8	78.6	21.4
600	115	105.7	8.1	89.2	22.4	88.5	23.1	89.7	22.0
800	140	131.4	6.1	110.4	21.2	109.0	22.2	112.1	19.9
1000	168	163.7	2.6	136.9	18.5	133.4	20.6	141.3	15.9
1200	192	197.8	3.0	165.0	14.1	159.0	17.2	172.4	10.2
1400	220	224.8	2.2	188.3	14.4	182.3	17.1	195.8	11.0
1600	245	258.7	5.6	216.9	11.5	211.5	13.7	223.6	8.7
1650	252	263.5	4.6	222.9	11.5	217.6	13.7	229.4	9.0
1700	261	268.6	2.9	229.2	12.2	224.0	14.2	235.6	9.7
1750	270	273.9	1.4	234.8	13.0	229.7	14.9	241.0	10.7
1800	280	279.2	0.3	240.4	14.1	235.5	15.9	246.5	12.0
1850	285	284.5	0.2	246.1	13.6	241.3	15.3	252.1	11.6
1900	292	289.8	0.7	251.8	13.8	247.1	15.4	257.6	11.8
1950	300	295.2	1.6	257.5	14.2	252.9	15.7	263.2	12.3
1970	307	297.9	3.1	260.4	15.3	255.8	16.8	266.0	13.4
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			90.4		305.3		330.3		277.7
Ajuste Promedio			5.0%		17.0%		18.4%		15.4%

Modelo térmico EAC-1 T 700									
Pozo EAC-1		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
100	45	37.9	15.7	33.7	25.0	34.2	23.9	33.1	26.5
200	62	55.1	11.1	47.8	22.9	48.2	22.3	46.7	24.7
400	85	85.0	0.0	72.2	15.1	72.0	15.3	71.4	16.0
500	100	98.8	1.2	83.5	16.5	83.0	17.0	83.3	16.7
600	115	112.6	2.1	94.8	17.6	93.9	18.3	95.3	17.1
800	140	140.3	0.2	117.5	16.1	116.0	17.1	119.4	14.7
1000	168	175.1	4.2	146.0	13.1	142.3	15.3	150.7	10.3
1200	192	211.7	10.3	176.2	8.2	169.8	11.6	184.2	4.1
1400	220	240.9	9.5	201.4	8.5	194.9	11.4	209.4	4.8
1600	245	277.3	13.2	232.1	5.3	226.3	7.6	239.3	2.3
1650	252	282.6	12.1	238.6	5.3	232.9	7.6	245.6	2.6
1700	261	288.1	10.4	245.3	6.0	239.8	8.1	252.2	3.4
1750	270	293.8	8.8	251.4	6.9	246.0	8.9	258.1	4.4
1800	280	299.5	7.0	257.5	8.0	252.2	9.9	264.0	5.7
1850	285	305.2	7.1	263.6	7.5	258.4	9.3	269.9	5.3
1900	292	310.9	6.5	269.7	7.6	264.6	9.4	275.9	5.5
1950	300	316.7	5.6	275.9	8.0	270.9	9.7	281.9	6.0
1970	307	319.6	4.0	278.9	9.2	274.1	10.8	284.9	7.3
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			129.0		207.0		233.7		177.5
Ajuste Promedio			7.2%		11.5%		13.0%		9.9%

Modelo térmico EAC-1 T 750									
Pozo EAC-1		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
100	45	39.6	12.1	35.0	22.2	31.3	30.5	34.3	23.7
200	62	58.0	6.5	50.0	19.3	44.8	27.7	48.9	21.2
400	85	89.9	5.8	76.2	10.4	70.8	16.8	75.3	11.4
500	100	104.7	4.7	88.2	11.8	82.7	17.3	88.1	11.9
600	115	119.5	3.9	100.3	12.8	94.6	17.8	100.9	12.3
800	140	149.2	6.6	124.6	11.0	118.5	15.3	126.6	9.6
1000	168	186.4	11.0	155.2	7.6	147.0	12.5	160.2	4.7
1200	192	225.7	17.6	187.5	2.4	176.9	7.9	196.0	2.1
1400	220	256.9	16.8	214.4	2.6	204.0	7.3	222.9	1.3
1600	245	296.0	20.8	247.3	0.9	238.1	2.8	255.0	4.1
1650	252	301.7	19.7	254.2	0.9	245.2	2.7	261.7	3.8
1700	261	307.5	17.8	261.5	0.2	252.7	3.2	268.8	3.0
1750	270	313.6	16.2	268.0	0.7	259.4	3.9	275.1	1.9
1800	280	319.8	14.2	274.5	2.0	266.1	5.0	281.4	0.5
1850	285	325.9	14.3	281.0	1.4	272.8	4.3	287.8	1.0
1900	292	332.0	13.7	287.6	1.5	279.6	4.3	294.2	0.8
1950	300	338.2	12.7	294.2	1.9	286.4	4.5	300.7	0.2
1970	307	341.3	11.1	297.5	3.2	289.8	5.7	303.9	1.1
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			225.6		112.7		189.4		114.5
Ajuste Promedio			12.5%		6.3%		10.5%		6.4%

Modelo térmico EAC-2 T 600									
Pozo EAC-2		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
50	30	16.7	44.4	16.6	44.6	16.5	44.9	16.8	43.8
200	40	36.8	8.1	35.8	10.4	34.9	12.7	38.9	2.6
400	80	61.0	23.7	59.1	26.2	57.1	28.6	65.6	18.0
600	105	81.1	22.8	78.3	25.5	75.5	28.1	85.5	18.6
800	125	99.7	20.3	96.1	23.1	92.5	26.0	101.9	18.5
1000	150	118.4	21.1	114.0	24.0	109.7	26.9	118.4	21.1
1050	155	123.1	20.6	118.5	23.5	114.0	26.5	122.6	20.9
1100	160	127.8	20.1	123.1	23.1	118.3	26.1	126.7	20.8
1150	165	132.5	19.7	127.6	22.7	122.7	25.7	130.9	20.7
1200	170	137.3	19.2	132.1	22.3	127.0	25.3	135.0	20.6
1250	175	142.0	18.8	136.7	21.9	131.4	24.9	139.2	20.5
1300	180	146.8	18.5	141.3	21.5	135.7	24.6	143.4	20.3
1350	185	151.6	18.1	145.8	21.2	140.1	24.3	147.6	20.2
1400	190	156.3	17.7	150.4	20.8	144.5	23.9	151.8	20.1
1450	195	161.1	17.4	155.0	20.5	148.9	23.6	156.0	20.0
1500	200	166.0	17.0	159.6	20.2	153.4	23.3	160.2	19.9
1550	202	170.8	15.5	164.3	18.7	157.8	21.9	164.4	18.6
1600	210	175.6	16.4	168.9	19.6	162.2	22.7	168.6	19.7
1650	215	180.6	16.0	173.8	19.2	167.0	22.3	173.3	19.4
1700	220	186.2	15.4	179.4	18.4	172.7	21.5	179.1	18.6
1750	225	191.8	14.7	185.1	17.7	178.4	20.7	184.9	17.8
1800	232	197.4	14.9	190.8	17.8	184.1	20.6	190.7	17.8
1850	240	203.1	15.4	196.4	18.1	189.9	20.9	196.5	18.1
1900	264	208.7	20.9	202.2	23.4	195.6	25.8	202.4	23.3
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			456.5		524.3		591.9		479.9
Ajuste Promedio			19.0%		21.8%		24.7%		20.0%

Modelo térmico EAC-2 T 650									
Pozo EAC-2		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
50	30	16.8	43.9	16.7	44.2	16.7	44.5	17.0	43.3
200	40	38.5	3.7	37.5	6.2	36.5	8.7	40.9	2.3
400	80	64.8	19.0	62.6	21.7	60.5	24.4	69.8	12.8
600	105	86.4	17.7	83.4	20.6	80.3	23.5	91.3	13.1
800	125	106.6	14.8	102.6	17.9	98.7	21.0	109.1	12.8
1000	150	126.8	15.5	122.1	18.6	117.3	21.8	126.9	15.4
1050	155	131.9	14.9	126.9	18.1	122.0	21.3	131.4	15.2
1100	160	137.0	14.4	131.8	17.6	126.7	20.8	135.9	15.1
1150	165	142.1	13.9	136.7	17.1	131.3	20.4	140.4	14.9
1200	170	147.3	13.4	141.6	16.7	136.0	20.0	144.9	14.8
1250	175	152.4	12.9	146.6	16.2	140.8	19.6	149.4	14.6
1300	180	157.5	12.5	151.5	15.8	145.5	19.2	154.0	14.5
1350	185	162.7	12.0	156.5	15.4	150.2	18.8	158.5	14.3
1400	190	167.9	11.6	161.4	15.0	155.0	18.4	163.0	14.2
1450	195	173.1	11.2	166.4	14.7	159.8	18.1	167.6	14.1
1500	200	178.3	10.8	171.4	14.3	164.6	17.7	172.2	13.9
1550	202	183.5	9.1	176.4	12.7	169.4	16.2	176.7	12.5
1600	210	188.8	10.1	181.5	13.6	174.2	17.1	181.3	13.7
1650	215	194.2	9.7	186.8	13.1	179.3	16.6	186.3	13.3
1700	220	200.3	9.0	192.9	12.3	185.5	15.7	192.6	12.4
1750	225	206.3	8.3	199.0	11.6	191.7	14.8	198.9	11.6
1800	232	212.4	8.4	205.1	11.6	197.9	14.7	205.2	11.5
1850	240	218.5	8.9	211.3	12.0	204.1	15.0	211.6	11.9
1900	264	224.7	14.8	217.5	17.6	210.3	20.3	217.9	17.4
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			320.6		394.6		468.4		349.4
Ajuste Promedio			13.4%		16.4%		19.5%		14.6%

Modelo térmico EAC-2 T 700									
Pozo EAC-2		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
50	30	17.0	43.5	16.9	43.8	16.8	44.1	17.2	42.8
200	40	40.3	0.7	39.2	2.0	38.1	4.7	42.9	7.2
400	80	68.5	14.4	66.2	17.3	63.9	20.1	73.9	7.6
600	105	91.8	12.6	88.5	15.7	85.2	18.9	97.1	7.5
800	125	113.4	9.2	109.2	12.6	105.0	16.0	116.2	7.1
1000	150	135.2	9.8	130.1	13.3	124.9	16.7	135.4	9.7
1050	155	140.7	9.2	135.3	12.7	130.0	16.2	140.2	9.5
1100	160	146.2	8.6	140.6	12.1	135.0	15.6	145.1	9.3
1150	165	151.7	8.1	145.9	11.6	140.0	15.1	149.9	9.1
1200	170	157.2	7.5	151.2	11.1	145.1	14.7	154.8	9.0
1250	175	162.8	7.0	156.5	10.6	150.2	14.2	159.6	8.8
1300	180	168.3	6.5	161.8	10.1	155.3	13.7	164.5	8.6
1350	185	173.9	6.0	167.1	9.7	160.4	13.3	169.4	8.4
1400	190	179.4	5.6	172.5	9.2	165.5	12.9	174.3	8.3
1450	195	185.0	5.1	177.8	8.8	170.6	12.5	179.2	8.1
1500	200	190.6	4.7	183.2	8.4	175.8	12.1	184.1	7.9
1550	202	196.3	2.8	188.6	6.6	180.9	10.4	189.1	6.4
1600	210	201.9	3.9	194.0	7.6	186.1	11.4	194.0	7.6
1650	215	207.8	3.4	199.7	7.1	191.7	10.9	199.4	7.3
1700	220	214.3	2.6	206.3	6.2	198.3	9.9	206.2	6.3
1750	225	220.8	1.9	212.9	5.4	204.9	8.9	212.9	5.4
1800	232	227.4	2.0	219.5	5.4	211.6	8.8	219.7	5.3
1850	240	234.0	2.5	226.1	5.8	218.3	9.0	226.6	5.6
1900	264	240.6	8.8	232.8	11.7	225.0	14.7	233.4	11.5
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			186.3		264.9		344.8		224.3
Ajuste Promedio			7.8%		11.0%		14.4%		9.3%

Modelo térmico EAC-2 T 750									
Pozo EAC-2		Grupo de conductividades térmicas							
Profundidad (m)	Temperatura registrada en pozo (°C)	K1		K2		K3		K4	
		Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado	Temperatura simulada (°C)	Valor absoluto del error normalizado
50	30	17.1	43.0	17.0	43.3	16.9	43.6	17.3	42.3
200	40	42.1	5.2	40.9	2.2	39.7	0.7	44.8	12.1
400	80	72.2	9.7	69.8	12.8	67.3	15.9	78.1	2.4
600	105	97.2	7.4	93.6	10.8	90.1	14.2	102.9	2.0
800	125	120.3	3.7	115.8	7.4	111.2	11.0	123.3	1.3
1000	150	143.7	4.2	138.1	7.9	132.6	11.6	143.9	4.1
1050	155	149.5	3.5	143.7	7.3	137.9	11.0	149.1	3.8
1100	160	155.4	2.9	149.4	6.6	143.3	10.4	154.3	3.6
1150	165	161.3	2.2	155.0	6.1	148.7	9.9	159.5	3.4
1200	170	167.2	1.6	160.7	5.5	154.1	9.3	164.7	3.1
1250	175	173.1	1.1	166.3	4.9	159.6	8.8	169.9	2.9
1300	180	179.1	0.5	172.0	4.4	165.0	8.3	175.1	2.7
1350	185	185.0	0.0	177.7	3.9	170.5	7.9	180.3	2.5
1400	190	191.0	0.5	183.5	3.4	176.0	7.4	185.6	2.3
1450	195	197.0	1.0	189.2	3.0	181.5	6.9	190.8	2.1
1500	200	203.0	1.5	195.0	2.5	187.0	6.5	196.1	2.0
1550	202	209.0	3.5	200.8	0.6	192.5	4.7	201.4	0.3
1600	210	215.1	2.4	206.6	1.6	198.1	5.7	206.7	1.6
1650	215	221.3	3.0	212.7	1.1	204.0	5.1	212.5	1.2
1700	220	228.3	3.8	219.7	0.1	211.1	4.1	219.7	0.1
1750	225	235.3	4.6	226.8	0.8	218.2	3.0	227.0	0.9
1800	232	242.4	4.5	233.8	0.8	225.4	2.9	234.3	1.0
1850	240	249.4	3.9	241.0	0.4	232.5	3.1	241.6	0.7
1900	264	256.5	2.8	248.1	5.9	239.7	9.1	248.9	5.6
Sumatoria de valores absolutos de los errores normalizados			116.6		143.6		221.3		104.1
Ajuste Promedio			4.9%		6.0%		9.2%		4.3%