

RESEARCH ARTICLE

Magnetotelluric applied to deep geothermal exploration: Canary Islands

Magnetotelúrica aplicada a la exploración geotérmica profunda: Islas Canarias

Perla Piña-Varas¹, Juanjo Ledo², Pilar Queralt¹, Alex Marcuello¹, Gemma Mitjanas¹, David Martínez Van Dorth³

¹ Institut Geomodels Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Universitat de Barcelona. 08028 Barcelona, España.

² Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, España.

³ Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN). 38320 La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, España.

Corresponding author: p.pina@ub.edu (Perla Piña-Varas)

Key points

Deep geothermal systems
geoelectrical characteriza-
tion

3-D resistivity models

Integration of MT with
other geophysical data,
geochemical data...

ABSTRACT

There is currently a growing interest in geothermal energy. Geothermal energy for electricity generation usually corresponds to deep reservoirs, located deeper than one kilometer. This will condition the geophysical methods to be used during the exploration of the geothermal system, being magnetotelluric (MT) the only electromagnetic method capable of reaching such depths. Commonly used in geothermal exploration, this method will provide information on the electrical resistivity distribution of the subsurface, and therefore will allow characterizing the main components of the system. This is the case of the seal of the reservoir, which will be easily detectable with MT since usually consists of a layer of clays resulting from hydrothermal alteration (the so-called clay cap). A reference for the application of this method to geothermal exploration can be found in the Canary Islands, where studies have been carried out on a regional scale for the last decade. The results obtained so far, with the generation of three-dimensional geolectrical models in three of the seven islands (Tenerife, Gran Canaria and La Palma), show the great value of this type of studies that will be used (and are already being used) as a basis for new geothermal exploration projects to be carried out in the archipelago.

Keywords: Magnetotelluric; Canary Islands; Deep geothermal systems.

Article History:

Received: 16/03/2023

Accepted: 26/07/2023

Puntos clave

Caracterización geoelect-
rica de sistemas
geotérmicos profundos

Modelos de resistividad
eléctrica 3-D

Integración de MT con
otros datos geofísicos,
geoquímicos...

RESUMEN

Hoy día existe un interés creciente por la energía geotérmica, debido en gran parte al impulso de las energías renovables. La geotermia destinada a la generación de electricidad suele corresponder a reservorios profundos, situados por debajo del kilómetro de profundidad. Esta circunstancia condicionará los métodos geofísicos a utilizar durante la etapa de exploración del sistema geotérmico, siendo la magnetotelúrica (MT) el único método electromagnético capaz de alcanzar tales profundidades. Comúnmente utilizado en la etapa de exploración, este método aportará información sobre la resistividad eléctrica del subsuelo, y por lo tanto permitirá caracterizar los componentes principales del sistema. Así, por ejemplo, el sello del reservorio que en muchas ocasiones está formado por una capa de arcillas producto de la alteración hidrotermal (*clay cap*), será fácilmente detectable con MT dada su alta conductividad eléctrica. Un referente de la aplicación de este método a la exploración geotérmica lo encontramos en las Islas Canarias, donde desde hace ya una década se vienen realizando estudios a escala regional. Los resultados obtenidos hasta la fecha, con la generación de modelos geoelectricos tridimensionales en tres de las siete islas (Tenerife, Gran Canaria y La Palma), muestran la gran utilidad de este tipo de estudios que servirán (y ya están siendo utilizados) como base para nuevos proyectos de exploración geotérmica que se lleven a cabo en el archipiélago.

Palabras clave: Magnetotelúrica; Islas Canarias; Geotermia profunda.

Historial del artículo:

Recibido: 16/03/2023

Aceptado: 26/07/2023

1. Introducción

El potencial geotérmico del archipiélago canario ha sido ampliamente estudiado desde mediados de los años setenta, cuando el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) inició un proyecto a nivel nacional para estudiar este recurso en todo el territorio. Debido a su vulcanismo activo, este archipiélago fue el principal objetivo del proyecto. Los trabajos se centraron principalmente en las islas de Gran Canaria, Lanzarote, La Palma y Tenerife, y se realizaron numerosos estudios vulcanológicos, petrológicos, geoquímicos y geofísicos. Entre los estudios realizados en aquellos años encontramos varias campañas de magnetotelúrica (MT), técnica que por entonces estaba en una etapa relativamente temprana de su desarrollo en aplicaciones comerciales. Curiosamente, las primeras aplicaciones comerciales de MT de las que se tiene constancia fueron para exploración geotérmica (Estados Unidos), y se remontan a finales de los años 50 - principios de los años 60 (Chave and Jones, 2012).

Entre 1992 y 1993, y como culminación de este proyecto nacional, se perforó un pozo de poco más de 1000 m de profundidad en el NO de la isla de Tenerife (IGME, 1993). Ante los resultados no del todo satisfactorios, al no alcanzarse temperaturas relevantes en la base del pozo, se produce entonces un parón en la exploración geotérmica en Canarias. En 2007 se retoma la actividad, cuando Petratherm S.L. y el Instituto Tecnológico de Energías Renovables (ITER) inician un nuevo proyecto alentados por el potencial geotérmico revelado por los estudios previos. Durante los años siguientes, y en colaboración con la Universidad de Barcelona (UB), se realizaron varias campañas de MT en la isla de Tenerife, que dieron lugar al primer modelo de resistividad eléctrica 3-D de la isla (Piña-Varas *et al.*, 2014). Desde entonces, ITER y UB, junto con el Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), han continuado trabajando en el estudio y caracterización de los sistemas geotérmicos de las diferentes islas canarias (principalmente los proyectos GEOTHERCAN y TERMOVOLCAN). Como resultado, en los últimos diez años se ha generado una gran cantidad de información procedente de diferentes estudios geoquímicos y geofísicos que sin duda servirá de base para la estimación del potencial geotérmico de las diferentes islas (p. ej., Rodríguez *et al.*, 2015a, 2015b; García-Ye-guas *et al.*, 2017; Piña-Varas, 2014; Piña-Varas

et al., 2014, 2015, 2018; Ledo *et al.*, 2020; Di Paolo *et al.*, 2020; Cabrera-Pérez *et al.*, 2023).

El interés por el potencial geotérmico del archipiélago canario y la exploración geotérmica en general, está viviendo una etapa de apogeo debido al impulso de las energías renovables. Este creciente interés pone de relieve la importancia de los estudios a escala regional (de toda la isla) realizados hasta la fecha en el archipiélago, entre los que destacan los modelos magnetotelúricos tridimensionales de tres de las siete islas: La Palma, Tenerife y Gran Canaria.

1.1. Magnetotelúrica: aplicación a estudios geotérmicos profundos

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica geofísica electromagnética de fuente natural que permite caracterizar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo a partir de las medidas simultáneas de las variaciones temporales del campo electromagnético terrestre ($\vec{E}(t)$ y $\vec{H}(t)$).

En los últimos años se han producido grandes avances tanto en la instrumentación, como en el desarrollo de nuevos algoritmos de inversión en 3-D o en las herramientas para analizar, visualizar e integrar con otros los datos y modelos magnetotelúricos con otros datos y modelos geológicos y geofísicos, etc. Este progreso, junto con la aparición de conceptos como el de los denominados "sistemas minerales" (Wyborn *et al.*, 1994; McCuaig and Hronsky, 2014) que contemplan una escala de trabajo regional, ha impulsado el uso de la MT por parte de empresas privadas del sector de la exploración mineral, geotérmica, etc. Por lo tanto, en la actualidad son frecuentes los proyectos que requieren de la adquisición de una gran cantidad de puntos de medida (del orden de hasta varios centenares) y la generación de grandes modelos de inversión tridimensionales. Así, la gran evolución experimentada en las últimas décadas hace de la MT un método geofísico competitivo, capaz de caracterizar una amplia variedad de estructuras geológicas.

En lo referente a la exploración geotérmica, la magnetotelúrica es una técnica ampliamente utilizada (p. ej., Pellerin *et al.*, 1996; Heise *et al.*, 2008; Newman *et al.*, 2008; Spichak and Manzella, 2009; Arnason *et al.*, 2010; Muñoz, 2014; Piña-Varas, 2014; Piña-Varas *et al.*, 2014, 2016; Ruiz-Aguilar *et al.*, 2020; Mitjanas *et al.*, 2021; Pace *et al.*, 2022) ya que permite caracterizar la

geometría de los componentes principales del sistema geotérmico, como por ejemplo, el sello del reservorio y/o las principales zonas de falla que puedan contener fluidos geotérmicos. Por un lado, en el estudio de este tipo de estructuras geológicas dominadas por la presencia de un determinado fluido confinado en una roca almacén, serán especialmente relevantes los métodos geofísicos basados en la medida de la resistividad eléctrica del subsuelo; ya que esta propiedad física es muy dependiente de parámetros tales como la porosidad de la roca, la proporción de poros saturados frente a los poros secos, las características del fluido de saturación, o la temperatura. Los denominados sistemas geotérmicos convencionales están asociados a un sistema de convección de agua caliente en el que el fluido asciende y queda atrapado en el reservorio por un sello (*clay cap*). Este sello, compuesto principalmente por arcillas, se formará por alteración hidrotermal al descender bruscamente la temperatura cerca de la superficie. La presencia de esta capa de arcillas generará fuertes contrastes de resistividad eléctrica que favorecerán la caracterización del sistema sello/reservorio.

Por otro lado, la profundidad a la que se sitúa la estructura a estudiar será un factor determinante a la hora de decidir qué métodos geofísicos son los más adecuados para su caracterización. Cuando se trata de sistemas geotérmicos de alta temperatura, adecuados para la producción de energía eléctrica, existirá un elevado flujo geotérmico con temperaturas por encima de los 150 °C a profundidades generalmente superiores al kilómetro. La MT es el único método electromagnético capaz de aportar información sobre las características del subsuelo a profundidades de varios kilómetros, razón por la cual será el único método electromagnético aplicable en el estudio de la mayoría de los sistemas geotérmicos.

En los siguientes apartados se comentarán los principales trabajos de exploración geotérmica basados en el uso de MT realizados hasta la fecha en las Islas Canarias. Concretamente nos centraremos en las islas de Tenerife, Gran Canaria y La Palma. En todas ellas se cuenta con modelos de resistividad 3-D que permiten caracterizar su estructura geoelectrica en profundidad a escala de isla (Figura 1).

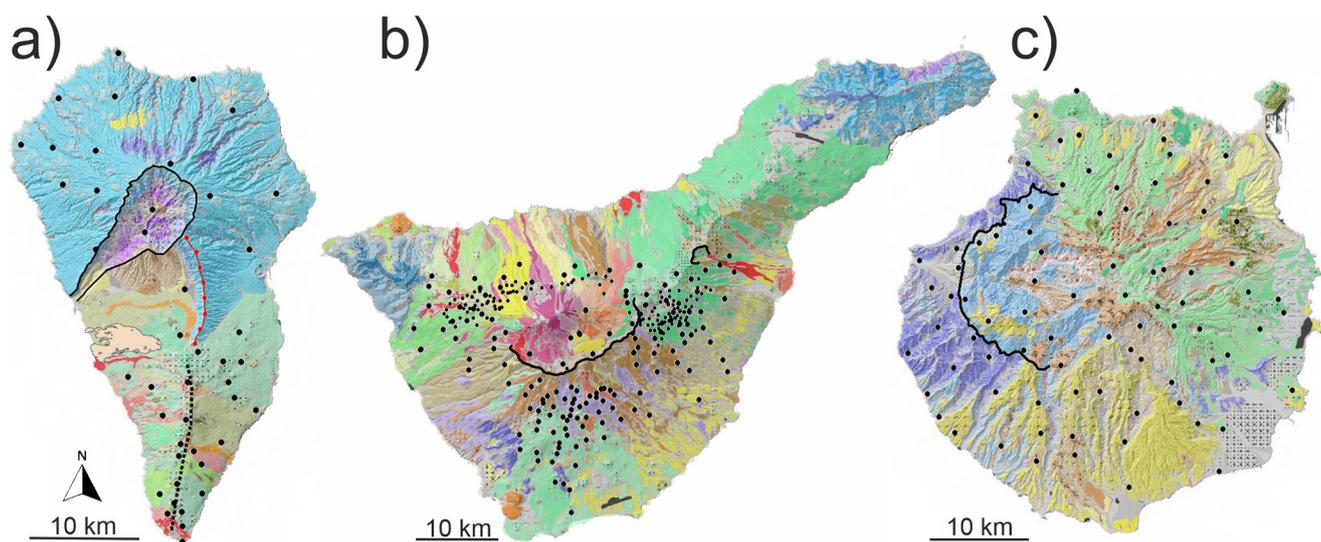


Figura 1. Mapa geológico de las islas con modelos tridimensionales de MT: a) La Palma; b) Tenerife; c) Gran Canaria. Puntos negros: localización de las estaciones magnetotelúricas; puntos negros pequeños (Tenerife): localización de las estaciones magnetotelúricas registrados en los años 80 por el IGME; líneas negras continuas: paredes actuales de las principales calderas; línea roja discontinua (La Palma): pared del deslizamiento de Cumbre Nueva; línea negra discontinua (La Palma): rift de Cumbre Nueva. Mapa geológico y leyenda consultar: Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (https://www.idecanarias.es/listado_servicios/mapa-geologico).

Figure 1. Geological map of the islands with 3-D MT models. a) La Palma, b) Tenerife, c) Gran Canaria island. Black points: location of the MT sites; small black points (Tenerife): location of the vintage MT sites recorded in the 80s by the IGME; black lines: main calderas current walls; red dashed line (La Palma): Cumbre Nueva landslide scar; black dashed line (La Palma): Cumbre Vieja main rift. Geological map and legend: Mapa geológico y leyenda consultar: Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (https://www.idecanarias.es/listado_servicios/mapa-geologico).

2. Tenerife: Referente del uso de MT para exploración geotérmica en España

La isla de Tenerife ha sido extensamente estudiada por su interés geotérmico desde la década de los 70-80. Ya entonces el IGME realizó varias campañas magnetoteléricas en la parte central de la isla vinculadas a estos estudios (Figura 1b, círculos pequeños). Estos suponen, junto a las campañas de MT realizadas en Lanzarote y en la zona de Caldes de Montbui-La Garriga, los primeros ejemplos de aplicación de este método geofísico para exploración geotérmica realizados en España (IGME, 1979, 1993).

A diferencia de las otras zonas de interés geotérmico anteriormente mencionadas, en la isla de Tenerife ha habido una continuidad en la realización de estudios magnetoteléricos que se extiende hasta la actualidad (p. ej., Pous *et al.*, 2002; Coppo *et al.*, 2008a, 2008b, 2009; Piña-Varas *et al.*, 2014, 2015, 2016, 2018).

Centrados en objetivos y aplicaciones diversas, estos trabajos de MT han aportado información fundamental para entender la estructura interna de la isla a diferentes escalas y caracterizar su sistema hidrotermal. De entre estos trabajos, destacarían por su relevancia los derivados de las campañas de campo llevadas a cabo entre 2009 y 2013 por Petra-therm, el Instituto Tecnológico de Energías Renovables (ITER) y la Universidad de Barcelona. Los datos adquiridos en este periodo de tiempo (151 sondeos de MT; Figura 1b) dieron lugar al primer modelo 3-D de resistividad eléctrica de la isla, y el primero también del archipiélago. Como resultado, se caracterizó el sistema sello/reservorio geotérmico a escala de toda la isla (Piña-Varas *et al.*, 2014).

La Figura 2 muestra un corte vertical E-O del modelo 3-D (Figura 2c) junto con un esquema conceptual de un sistema geotérmico convencional (Figura 2b; Cumming, 2007). Como se apuntaba

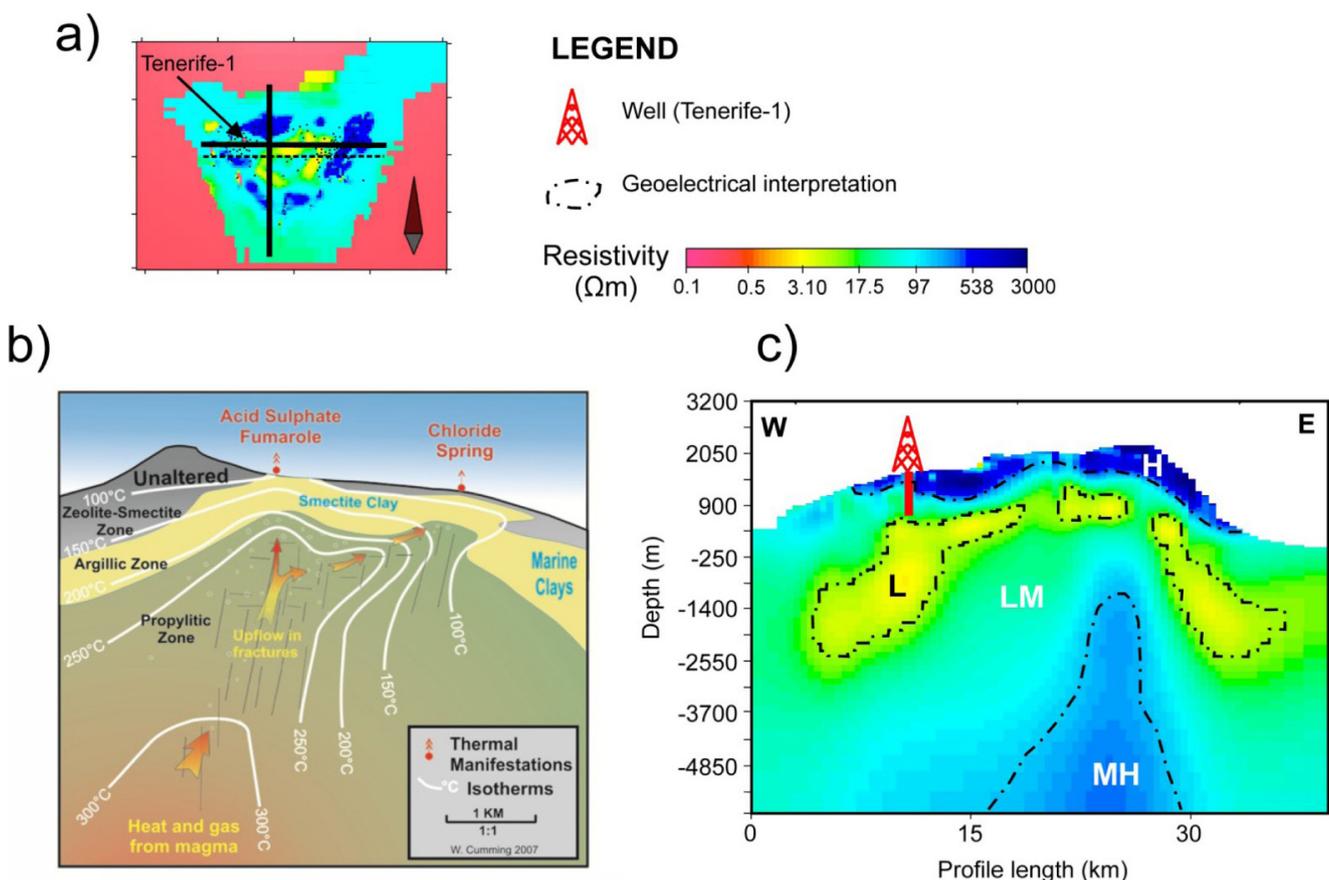


Figure 2. a) Esquema con la localización de la sección vertical mostrada, línea continua E-O. El mapa representa la distribución de resistividades 1200 m s.n.m. b) Sección vertical del modelo conceptual de un sistema geotérmico de 250-300 °C (Cumming, 2007). c) Sección vertical E-O del modelo 3-D de MT (Piña-Varas *et al.*, 2014).

Figure 2. a) Location of the vertical section shown in this figure, continuous line E-W. The map represents the distribution of the electrical resistivity at 1200 m a.s.l. b) Vertical section of a 250-300 °C geothermal system conceptual model (Cumming, 2007). c) E-W vertical section of the 3-D MT model (Piña-Varas *et al.*, 2014).

en la introducción, en estos sistemas geotérmicos la resistividad eléctrica estará controlada principalmente por la presencia de productos de alteración hidrotermal, tales como arcillas (esmectita y la esmectita/illita). Este tipo de arcillas predominan a temperaturas comprendidas entre los 50 y los 200 °C y se caracterizan por valores de resistividad eléctrica bajos, del orden de 1-10 ohm·m (Browne, 1978). Como consecuencia, se formará una capa de arcillas sobre zona de ascenso de los fluidos caracterizada por valores muy bajos de resistividad eléctrica, mientras que las zonas de mayores temperaturas del sistema se caracterizarán por resistividades eléctricas mayores (Ussher *et al.*, 2000). Esta capa conductora constituye generalmente el sello del reservorio (Ánderson *et al.*, 2000; Cumming *et al.*, 2000; Figura 2b).

Entre los años 1992-1993, y como culminación a los trabajos de exploración geotérmica realizados en los años anteriores, el IGME perforó un pozo (Tenerife-1) de 1060 m de profundidad en el extremo NO de la isla (IGME, 1993). La sección mostrada en la Figura 2c coincide con la ubicación de dicho pozo (en rojo en la figura), mostrando como apenas llega a alcanzar el *clay cap*. La temperatura registrada en la base del pozo fue de 56 °C, temperatura comitente con los valores registrados en el techo de los *clay caps* de sistemas geotérmicos activos (Browne, 1978).

Un aspecto muy interesante de los trabajos llevados a cabo en Tenerife en los últimos años ha sido la integración del modelo 3-D de MT con otros modelos y conjuntos de datos. Por un lado, en el trabajo publicado por Rodríguez *et al.* (2015) se interpretan conjuntamente datos geoquímicos y geofísicos para caracterizar el sistema geotérmico en la zona de la dorsal sur de Tenerife (Figura 3a). Los resultados muestran una correlación inversa entre el espesor de la capa conductora interpretada en el modelo de MT como el *clay cap* y el enriquecimiento de gases no reactivos como el He (Figura 3a). Esto se interpretó como debido a la presencia de discontinuidades de permeabilidad en la zona de estudio, lo que permitirá definir áreas de especial interés para una investigación más detallada, minimizando la incertidumbre en la localización de posibles sondeos mecánicos. Por otro lado, el modelo 3-D de MT se combinó con el modelo 3-D de tomografía sísmica mediante la utilización del método *Fuzzy Clusters* (García-Yeguas *et al.*, 2017). Esto permitió obtener cinco clusters definidos según sus valores de resistividad eléctrica y velocidad

sísmica de ondas P, lo que permite interpretar con más detalle la compleja estructura interna de la isla de Tenerife (Figura 3b).

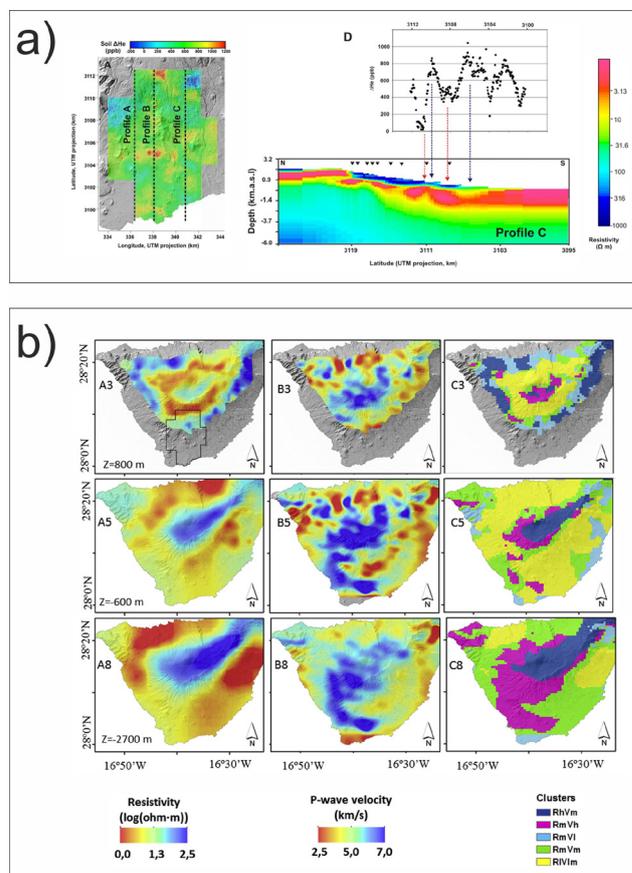


Figura 3. a) Panel derecho: Valores de He en el suelo y corte vertical del modelo de resistividad 3-D a lo largo del perfil C. Panel izquierdo: mapa de ΔHe mostrando la ubicación del perfil N-S del modelo de MT. Las flechas discontinuas azules y rojas indican la correlación positiva y negativa observada entre los valores más altos de He y las discontinuidades del *clay cap* y los valores más bajos de He y un mayor grosor del *clay cap*, respectivamente. Los triángulos negros muestran la ubicación de los sites de MT (Rodríguez *et al.*, 2015b). b) A3–A8: Imágenes del modelo de resistividad (Piña-Varas *et al.*, 2014). B3–B8: Velocidad de onda P del modelo de tomografía de García-Yeguas *et al.* (2012). C3–C8: Distribución de los clusters obtenidos para diferentes profundidades: 800, -600 m y -2700 m s.n.m. (García-Yeguas *et al.*, 2017).

Figure 3. a) Right panel: Depict values of soil He and results of the final 3-D resistivity model along profile C. Left panel: ΔHe map showing the location of the N-S resistivity cross-section shown here. Blue and red dashed arrows indicate observed positive and negative correlation between highest values of He and clay cap discontinuities and lowest values of He and the thicker clay cap, respectively. Inverse black triangles show the location of MT sites (Rodríguez *et al.*, 2015b). b) A3–A8: Map views of the resistivity model (Piña-Varas *et al.*, 2014). B3–B8: P wave velocity of the tomography model of García-Yeguas *et al.* (2012). C3–C8: Clusters distribution obtained for different depths: 800 m and -2700 m a.s.l. (García-Yeguas *et al.*, 2017).

Aunque las ventajas y beneficios de la integración de diferentes datos y modelos procedentes de diferentes técnicas son de sobra conocidos, llama la atención el limitado número de ejemplos que ponen en práctica este enfoque. Por lo tanto, los estudios realizados en Tenerife destacan por su novedad en cuanto a los métodos combinados (p.ej., datos geoquímicos y geofísicos), o las técnicas utilizadas en el caso concreto de terrenos volcánicos (p.ej., *Fuzzy Clusters*).

3. Gran Canaria: Hay que venir al sur

La isla de Gran Canaria también fue incluida en el proyecto de exploración geotérmica llevado a cabo por el IGME en los años 70-80, aunque la mayoría de los trabajos realizados en aquella época se centraron en Tenerife (especialmente en la etapa final del proyecto). En los primeros informes derivados de estos trabajos se resaltan como zonas favorables y de interés geotérmico las zonas sur y sur-este de Gran Canaria (IGME, 1977). Por lo tanto, el potencial geotérmico de la isla es desde hace tiempo bien conocido.

Entre los pocos estudios realizados desde entonces centrados en caracterizar la estructura del sistema geotérmico de la isla, encontramos el publicado por Ledo *et al.* (2021). En este trabajo se presenta el modelo 3-D de MT de toda la isla (Figuras 4 y 5), de manera similar al anteriormente mostrado para Tenerife. En este caso se utilizaron 100 sondeos de MT repartidos por toda la isla, adquiridos durante el año 2017 por la UB, ITER e INVOLCAN (Figura 1). El modelo resultante muestra tres zonas bien diferenciadas (Figura 4):

- Una zona de alta resistividad que se extiende prácticamente desde superficie hasta zonas profundas (marcada con la letra R1 en la Figura 4). Este cuerpo resistivo coincide con la localización de la caldera de Tejeda en superficie, mientras que en profundidad se extiende hacia sureste, dividiendo la isla por la mitad (Figura 4).
- Dos zonas de resistividades medias-bajas situadas al norte y sur del cuerpo resistivo anteriormente mencionado, ya fuera de los límites de la caldera de Tejeda. En ambas zonas se dan valores de resistividad bajos, inferiores a los 10 ohm·m característicos de los productos de alteración hidrotermal asociados a sistemas geotérmicos convencio-

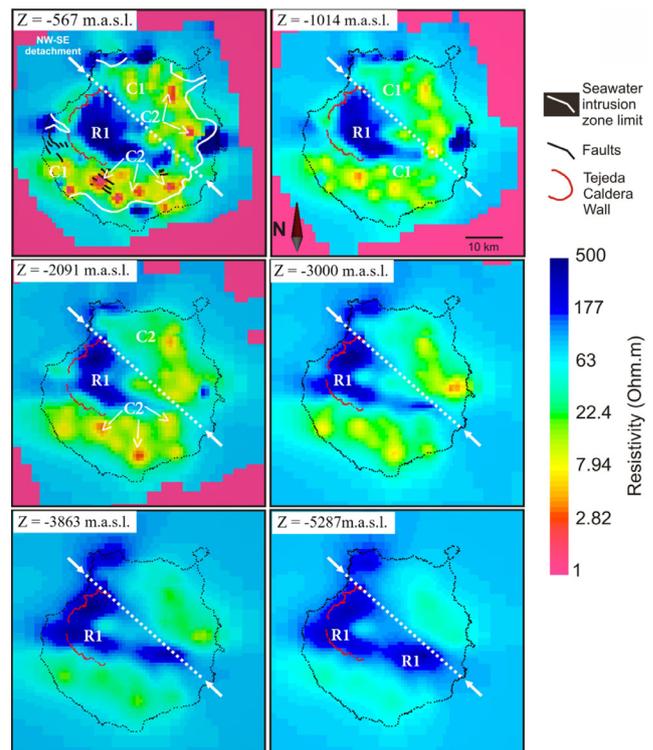


Figura 4. Vistas en planta del modelo de resistividades 3-D a diferentes profundidades. Línea blanca discontinua: posible rift (Ledo *et al.*, 2021).

Figure 4. Horizontal cross-sections of the 3-D electrical resistivity model. White dashed line: possible rift zone (Ledo *et al.*, 2021).

nales. Un rasgo distintivo de estas estructuras más conductoras es su reducida extensión lateral y gran desarrollo vertical, pudiéndose distinguir, por lo tanto, diferentes cuerpos (marcados como C2 en la Figura 4). Estas estructuras son más abundantes y tienen un mayor desarrollo en la zona sur de la isla, donde además coinciden con la localización de rocas alteradas hidrotermalmente (Figura 5).

Estos resultados aportan información muy valiosa, ya que han permitido identificar áreas muy concretas que podrían estar vinculadas a la circulación de fluidos hidrotermales. Son las estructuras conductoras verticales de la zona sur de la isla (Figuras 4 y 5) las que se consideran más interesantes para realizar estudios de detalle (incluyendo campañas de MT con una mayor densidad de puntos de medida), y determinar así su potencial geotérmico.

Por lo tanto, el modelo 3-D de MT servirá de base para los futuros estudios y proyectos de exploración geotérmica que se lleven a cabo en

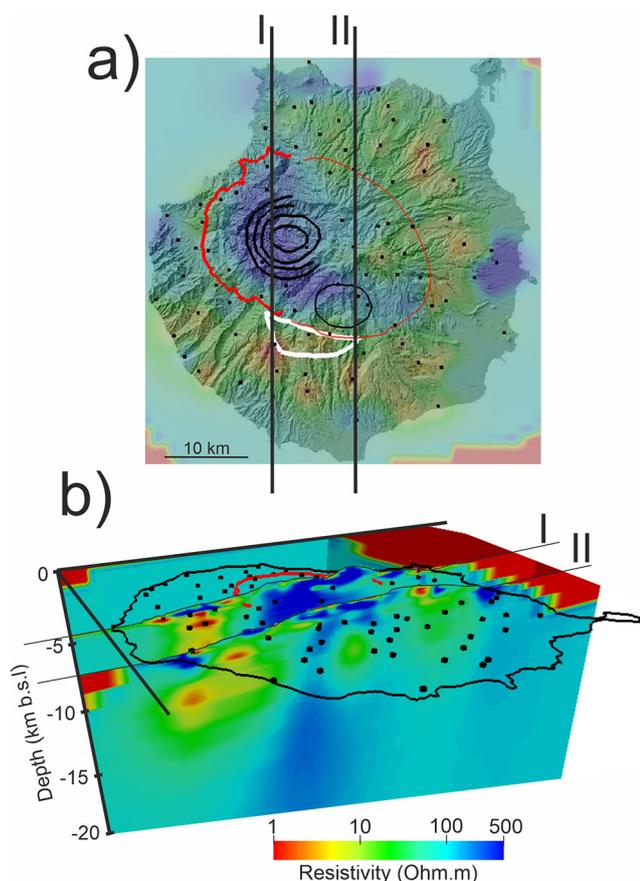


Figura 5. a) Vista en planta del modelo de resistividades a -1014 m s.n.m. b) Vista 3-D del modelo donde se muestran dos secciones verticales concretas. Líneas negras I y II: perfiles verticales; línea roja gruesa: pared actual de la caldera de Tejedá; línea roja fina: pared inferida de la caldera de Tejedá; contornos negros: conos volcánicos; contorno blanco: zona de alteración hidrotermal.

Figure 5. a) Map view of the resistivity model at -1014 m a.s.l. b) 3-D view of the model showing two specific vertical sections. Black lines I and II: vertical profiles; thick red line: current wall of the Tejedá caldera; thin red line: inferred wall of the Tejedá caldera; black outlines: volcanic cones; white outline: hydrothermal alteration zone.

la isla, como ya ha quedado patente en algunos trabajos presentados por empresas privadas del sector energético (p.ej., Torres Torremocha *et al.*, 2022).

4. La Palma: Más allá de la exploración geotérmica

En la isla de La Palma se han publicado hasta la fecha dos estudios basados en el uso de la MT (García and Jones, 2010; Di Paolo *et al.*, 2020). Es la publicación más reciente, Di Paolo *et al.*, 2020, la que se centra en el estudio y caracterización del sistema geotérmico de La Palma. De manera similar a los trabajos realizados en Tene-

rife y Gran Canaria, se presenta aquí un modelo geoelectrico tridimensional a escala de toda la isla (Figura 6). Sin embargo, a diferencia de las otras dos islas y en gran parte debido a la difícil orografía de la isla, el número de puntos de medida aquí registrados es considerablemente menor (Figura 1a). Por otro lado, la mayoría de los puntos se registraron en la zona sur (más joven) de la isla, ya que se considera de mayor interés geotérmico.

El modelo resultante muestra una estructura claramente diferente entre las zonas norte y sur de la isla. Mientras que el norte presenta una estructura relativamente sencilla dominada por resistividades altas asociadas a un cuerpo intrusivo bajo el dominio de Taburiente (Figura 1a), el sur muestra una estructura mucho más compleja. En esta zona se observan unas anomalías conductoras a ambos lados de la dorsal de Cumbre Vieja (Figura 1a), caracterizada por una resistividad mayor (Di Paolo *et al.*, 2020). Los valores de resistividad, por debajo de los 10 ohm·m, y la buena correlación de estos cuerpos conductores con anomalías de baja densidad identificadas en estudios previos, indican que puede tratarse de arcillas generadas por alteración hidrotermal. Por lo tanto, estas estructuras apuntan hacia la posible presencia de un sistema hidrotermal alrededor del Cumbre Vieja.

Por otra parte, a raíz de la reciente erupción volcánica de Cumbre Vieja (2021) se ha generado una importante cantidad de datos e información de gran valor para el avance del conocimiento de la estructura interna de la isla. En lo referente al uso de la MT, no se han publicado hasta la fecha nuevos datos o modelos de resistividad eléctrica que complementen el modelo 3-D existente. Sin embargo, la nueva información derivada de la erupción volcánica puede tener importantes implicaciones en términos de fortalecer o rebatir el modelo 3-D de MT de la isla y su interpretación.

Los días previos a la erupción se produjeron una gran cantidad de terremotos, con profundidades cada vez más someras. Visualizando conjuntamente estos terremotos y el modelo de resistividad 3-D, se observa una disminución sustancial del número de eventos en la capa conductora interpretada como el *clay cap* del sistema hidrotermal (Figura 6). Existen dos zonas principales donde se concentran el mayor número de terremotos: a profundidades entre 6 y 10 km b.n.m (bajo el nivel del mar; A en la Figura 6) y en superficie, por encima de 1 km b.n.m (B en la Figura 6). La zona intermedia está caracterizada por

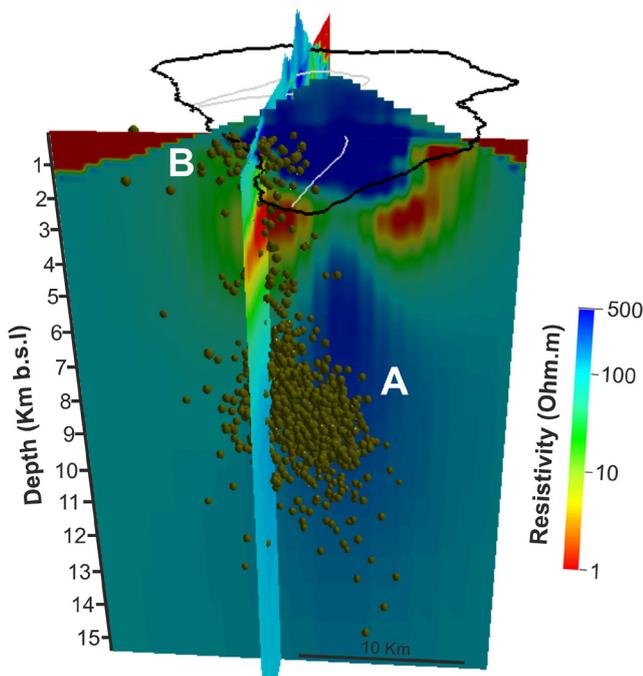


Figura 6. Vista 3-D del modelo de resistividad eléctrica de la isla de La Palma obtenido por Di Paolo *et al.*, 2020 junto con los terremotos registrado entre el 16 y el 19 de Septiembre de 2021 (esferas verdes). Linea negra: contorno de la isla; líneas grises: Limite de la caldera de Taburiente (al N) y rift de Cumbre Vieja (al S).

Figure 6. 3-D view of the resistivity model of La Palma island obtained by Di Paolo *et al.*, 2020 together with the earthquakes recorded between 16/09/2021 and 19/09/2021 (green spheres). Black line: outline of the island; gray lines: Limit of the Taburiente caldera (to the N) and rift of Cumbre Vieja (to the S).

valores de resistividad mucho más bajos vinculados a la presencia de una capa de arcillas resultantes de la alteración hidrotermal de las rocas volcánicas. El hecho de que precisamente en esta zona se produzca un menor número de terremotos ratifica de algún modo la información y resultados aportados por el modelo de MT.

Este hecho permite ir más allá de la exploración geotérmica en sentido estricto, al proporcionarnos una herramienta para validar el modelo de resistividades y su interpretación a profundidades superiores al kilómetro, donde es difícil contar con cualquier tipo de comprobación directa.

5. Conclusiones

El uso de la magnetotelúrica en estudios de exploración geotérmica es una práctica común y sus ventajas (y limitaciones) son de sobra conocidos. Los avances que ha experimentado el propio método en las últimas décadas y la progresión

actual de nuevas mejoras, hacen de esta una técnica esencial en la mayoría de los proyectos de exploración geotérmica profunda. Una prueba de ello son las Islas Canarias.

En los últimos diez años se han realizado modelos de resistividad 3-D de tres de las siete islas del archipiélago. Estos modelos cubren la totalidad de la isla, buscando caracterizar la estructura geoelectrica profunda, donde otros métodos no alcanzan. La información aportada por estos modelos pone de manifiesto la gran utilidad de este tipo de estudios, ya que permiten identificar y caracterizar la geometría de estructuras tan relevantes como el sello del potencial reservorio geotérmico. Aun así, cabe resaltar las grandes diferencias entre los modelos obtenidos, entre islas. Aunque con similitudes en cuanto a los valores de resistividad de ciertas estructuras, las geometrías reveladas con MT son muy distintas, resaltando la necesidad de adaptar los trabajos a cada caso concreto.

La realización de nuevos modelos, la adquisición de nuevos puntos de medida en zonas de especial interés marcadas por los modelos ya existentes (p. ej., el sur de Gran Canaria) o la integración de los modelos de resistividad con datos de otros métodos geofísicos, geoquímicos, etc. (como, por ejemplo, se ha estado haciendo en Tenerife), será fundamental para continuar en el avance del conocimiento de los sistemas geotérmicos de las diferentes islas.

Agradecimientos

Parte de los trabajos aquí presentados han sido financiados por los proyectos TED2021-131882B; "GEOETHER-CAN" (Ref. IPT-2011-1186-920000) y "TERMOVOLCAN (Ref. RTC-2017-6627-3).

Referencias

- Anderson, E., Crosby, D., and Ussher, G. N. (2000). Bulls-eye! - Simple resistivity imaging to reliably locate the geothermal reservoir. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
- Anderson, E., Johnstone, R., Harvey, C., and Ussher, G. (2000). Understanding the Resistivities Observed in Geothermal Systems. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
- Árnason, K., Eysteinnsson, H., and Hersir, G. P. (2010). Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D in-

- version of MT data in the Hengill area, SW Iceland. *Geothermics*, 39(1), 13–34. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.01.002>
- Browne, P. R. L. (1978). Hydrothermal Alteration in Active Geothermal Fields. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 6(1), 229–248. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.06.050178.001305>
- Cabrera-Pérez, I., Soubestre, J., D'Auria, L., van Dorth, D. M., Ledo, J., Piña-Varas, P., ... Pérez, N. M. (2023). Ambient noise tomography of Gran Canaria island (Canary Islands) for geothermal exploration. *Geothermics*, 108, 102609. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102609>
- Chave, A., and Jones, A. (2012). *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020138>
- Coppo, N. P., Schnegg, P.-A., Falco, P., and Costa, R. (2009). A deep scar in the flank of Tenerife (Canary Islands): Geophysical contribution to tsunami hazard assessment. *Earth and Planetary Science Letters*, 282(1), 65–68. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.017>
- Coppo, N., Schnegg, P.-A., Falco, P., Costa, R., & Burkhard, M. (2008). Structural pattern of the western Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands) revealed by audiomagnetotellurics. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(2), 409–413. <https://doi.org/10.1007/s00015-008-1270-4>
- Coppo, N., Schnegg, P.-A., Heise, W., Falco, P., and Costa, R. (2008). Multiple caldera collapses inferred from the shallow electrical resistivity signature of the Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(3), 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.09.013>
- Cumming, W. (2009). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. PROCEEDINGS, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 9-11, 2009, SGP-TR-187.
- Cumming, W., and Mackie, R. (2007). 3D MT resistivity imaging for geothermal resource assessment and environmental mitigation at the Glass Mountain KGRA, California. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 31, 331–334.
- Cumming, W., Nordquist, G., and Astra, D. (2000). Geophysical Exploration for Geothermal Resources: an Application For Combined MT-TDEM. 2000 SEG Annual Meeting, p. SEG-2000-1071.
- Di Paolo, F., Ledo, J., Ślęzak, K., Martínez van Dorth, D., Cabrera-Pérez, I., and Pérez, N. M. (2020). La Palma island (Spain) geothermal system revealed by 3D magnetotelluric data inversion. *Scientific Reports*, 10(1), 18181. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75001-z>
- García, X., and Jones, A. G. (2010). Internal structure of the western flank of the Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands, from land magnetotelluric imaging. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B7). <https://doi.org/10.1029/2009JB006445>
- García-Yeguas, A., Ledo, J., Piña-Varas, P., Prudencio, J., Queralt, P., Marcuello, A., ... Pérez, N. (2017). A 3D joint interpretation of magnetotelluric and seismic tomographic models: The case of the volcanic island of Tenerife. *Computers & Geosciences*, 109, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.08.003>
- Heise, W., Caldwell, T. G., Bibby, H. M., and Bannister, S. C. (2008). Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophysical Journal International*, 173(2), 740–750. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03737.x>
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1977). Evaluación del potencial geotérmico de la isla de Lanzarote y selección de anomalías de las Islas Canarias (Informe final I). Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1979). Estudio magnetotélúrico y audio -MT de las anomalías geotérmicas de Caldes de Montbui y La Garriga. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1993). Investigación geotérmica en el área central de la isla de Tenerife. Informe final. Madrid.
- Ledo, J., García-Merino, M., Larnier, H., Ślęzak, K., Piña-Varas, P., Marcuello, A., ... Sumita, M. (2021). 3D electrical resistivity of Gran Canaria island using magnetotelluric data. *Geothermics*, 89, 101945. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101945>
- McCuaig, T. C., and Hronsky, J. M. A. (2014). The Mineral System Concept: The Key to Exploration Targeting (K. D. Kelley and H. C. Golden, Eds.). *Building Exploration Capability for the 21st Century*, Vol. 18, p. 0. <https://doi.org/10.5382/SP.18.08>
- Mitjanas, G., Ledo, J., Macau, A., Alías, G., Queralt, P., Bellmunt, F., ... Figueras, S. (2021). Integrated seismic ambient noise, magnetotellurics and gravity data for the 2D interpretation of the Vallès basin structure in the geothermal system of La Garriga-Samalus (NE Spain). *Geothermics*, 93, 102067. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102067>
- Muñoz, G. (2014). Exploring for Geothermal Resources with Electromagnetic Methods. *Surveys in Geophysics*, 35(1), 101–122. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9236-0>
- Newman, G. A., Gasperikova, E., Hoversten, G. M., and Wannamaker, P. E. (2008). Three-dimensional magnetotelluric characterization of the Coso geothermal field. *Geothermics*, 37(4), 369–399. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.02.006>
- Pace, F., Martí, A., Queralt, P., Santilano, A., Manzella, A., Ledo, J., and Godio, A. (2022). Three-Dimensional Magnetotelluric Characterization of the Tra-

- vale Geothermal Field (Italy). *Remote Sensing*, Vol. 14. <https://doi.org/10.3390/rs14030542>
- Pellerin, L., Johnston, J. M., and Hohmann, G. W. (1996). A numerical evaluation of electromagnetic methods in geothermal exploration. *Geophysics*, 61(1), 121–130. <https://doi.org/10.1190/1.1443931>
- Piña-Varas, P., Ledo, J., Campanyà, J., Queralt, P., and Marcuello, A. (2016). A review of geothermal exploration by magnetotelluric imaging in Tenerife. *First Break*, 34(8). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.34.8.86175>
- Piña-Varas, P., Ledo, J., Queralt, P., Marcuello, A., Bellmunt, F., Hidalgo, R., and Messeiller, M. (2014). 3-D Magnetotelluric Exploration of Tenerife Geothermal System (Canary Islands, Spain). *Surveys in Geophysics*, 35(4), 1045–1064. <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9280-4>
- Piña-Varas, P., Ledo, J., Queralt, P., Marcuello, A., Bellmunt, F., Ogaya, X., ... Rodríguez-Losada, J. A. (2015). Vertical collapse origin of Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands) revealed by 3-D magnetotelluric inversion. *Geophysical Research Letters*, 42(6), 1710–1716. <https://doi.org/10.1002/2015GL063042>
- Piña-Varas, P. (2014). Aplicación del método magnetotelúrico a la caracterización de reservorios: Anticlinal de El Hito (Cuenca) y Sistema Geotérmico de Tenerife. Universitat de Barcelona.
- Piña-Varas, P., Ledo, J., Queralt, P., Marcuello, A., and Perez, N. (2018). On the detectability of Teide volcano magma chambers (Tenerife, Canary Islands) with magnetotelluric data. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0783-y>
- Pous, J., Heise, W., Schnegg, P.-A., Muñoz, G., Marfí, J., and Soriano, C. (2002). Magnetotelluric study of the Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands): structural and hydrogeological implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 204(1), 249–263. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00956-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00956-1)
- Rodríguez, F., Pérez, N. M., Padrón, E., Melián, G., Hernández, P. A., Asensio-Ramos, M., ... Hidalgo, R. (2015). Diffuse Helium and Hydrogen Degassing to Reveal Hidden Geothermal Resources in Oceanic Volcanic Islands: The Canary Archipelago Case Study. *Surveys in Geophysics*, 36(3), 351–369. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9320-8>
- Rodríguez, F., Pérez, N. M., Padrón, E., Melián, G., Piña-Varas, P., Dionis, S., ... Hidalgo, R. (2015). Surface geochemical and geophysical studies for geothermal exploration at the southern volcanic rift zone of Tenerife, Canary Islands, Spain. *Geothermics*, 55, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.02.007>
- Ruiz-Aguilar, D., Tezkan, B., Arango-Galván, C., and Romo-Jones, J. M. (2020). 3D inversion of MT data from northern Mexico for geothermal exploration using TEM data as constraints. *Journal of Applied Geophysics*, 172, 103914. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103914>
- Spichak, V., and Manzella, A. (2009). Electromagnetic sounding of geothermal zones. *Journal of Applied Geophysics*, 68(4), 459–478. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.05.007>
- Torres Torremocha, J., Hernández Jiménez, P., García Craviotto, A., García Saiz, I., and Arnaiz Giménez-Coral, Á. (2022). Geothermal Model of Gran Canaria; an Integration of Geological, Geophysical and Geochemical Data. 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition, Jun 2022, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202210954>
- Wyborn, L. A. I., Heinrich, C. A., and Jaques, A. (1994). Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. *Publication Series of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 5, 109–115.