

RESEARCH ARTICLE

The HYDROTHERM code as a tool for integrating geophysics in geothermal prospecting

El código HYDROTHERM como herramienta de integración de la geofísica en prospección geotérmica

Celestino García de la Noceda¹, José F. Albert Beltrán²

¹ Instituto Geológico y Minero de España, 28003 Madrid, España.

² Arika Geotermia, 28029 Madrid, España.

Corresponding author: c.garcia@igme.es (Celestino García de la Noceda)

Key points

Hydrotherm reproduces geological, geophysical and borehole data.

Model magma chambers and geothermal reservoirs.

Answer previous questions.

ABSTRACT

The use of numerical codes in simulating geothermal reservoirs is one of the most powerful tools for integrating geology, geochemistry, and geophysics in high enthalpy geothermal research processes. This paper summarizes some examples of USGS HYDROTHERM code application results on the islands of Gran Canaria, Lanzarote, and Tenerife, which are considered very different geothermal models. The first island has normal geothermal gradient, the second has magmatic bodies near the surface and Tenerife has a comparison between geophysical techniques to determine the recharge-discharge flows of the Cañadas-Teide system. In the first two islands there are boreholes that allow adjusting and validating the models, whereas Tenerife or La Palma have been studied using the same methodology but lack verification boreholes. Nevertheless, their model results are consistent with other geophysical techniques. This highlights the great potential of this code as an integrating tool for the different prospecting techniques to understand geothermal system operations and determine the most suitable location for deep exploration drilling. The significant benefit of this code is the capability to reproduce different evolutionary and casuistry models reliably using the same geological and thermal parameters for all islands.

Keywords: Hydrotherm; Geophysics; Geothermal energy.

Article History:

Received: 13/03/2023

Accepted: 14/08/2023

Puntos clave

Hydrotherm reproduce datos geológicos, geofísicos y sondeos.

Modeliza cámaras magmáticas y yacimientos geotérmicos.

Responde a interrogantes previos.

RESUMEN

La utilización de códigos numéricos en la simulación de yacimientos geotérmicos constituye una de las herramientas actuales más potentes de integración de la geología, geoquímica y geofísica en los procesos de investigación geotérmica de alta entalpía. En el presente trabajo se resumen algunos ejemplos de los resultados de la aplicación del código HYDROTHERM del USGS en las islas de Gran Canaria, Lanzarote y Tenerife por considerarse modelos geotérmicos muy diferentes: la primera con gradiente geotérmico normal, la segunda con cuerpos magmáticos cercanos a la superficie y Tenerife con una comparativa entre técnicas geofísicas para determinar los flujos de recarga-descarga del sistema Cañadas-Teide. En las dos primeras islas existen sondeos que permiten ajustar y validar los modelos. Tenerife o La Palma, han sido también estudiadas con la misma metodología, pero carecemos de sondeos de comprobación, aunque los resultados del modelo resulten coincidentes con otras técnicas geofísicas. Se pone así de manifiesto su gran potencial como herramienta integradora de las diferentes técnicas prospectivas para comprender el funcionamiento del sistema geotérmico y determinar la ubicación más idónea de los sondeos de reconocimiento profundo. La mayor bondad de este código ha sido que, empleando los mismos parámetros geológicos y térmicos para todas las islas, se han logrado reproducir modelos evolutivos y casuísticas muy diferentes con excelentes resultados.

Palabras clave: Hydrotherm; Geofísica; Energía geotérmica.

Historial del artículo:

Recibido: 13/03/2023

Aceptado: 14/08/2023

1. Introducción

La geología, geoquímica y geofísica han sido tradicionalmente los métodos de estudio que se terminan integrando para decidir la idoneidad o no de llevar a cabo los sondeos profundos de reconocimiento geotérmico.

En geoquímica, la aparición de los geotermómetros de fase líquida en la década de los 60 constituyó un avance importante en la prospección geotérmica. Con posterioridad, se pasó a la geo-termometría de fase gaseosa e isotópica. Se disponía ya de herramientas para calcular las temperaturas de equilibrio termodinámico fluido-mineral en el subsuelo. Esta misma termodinámica mineral se utiliza hoy en día, a pie de máquina, para tener una idea de las isothermas que se están cortando sin necesidad de parar la perforación.

En geofísica se han ensayado todas las técnicas: gravimetría, magnetometría, eléctrica, sondeos electromagnéticos en dominio de tiempos (SEDT), Audio magneto-telúrico y magneto-telúrico (MT), sísmica activa y pasiva... Durante los últimos 40 años, el hardware y el software han evolucionado de manera espectacular y la experiencia nos han llevado a preferir la MT y la gravimetría como técnicas más certeras, apoyadas en ocasiones por la sísmica (ralentización de ondas P, microsismicidad, etc.).

La aparición de los ordenadores y, con ellos, la posibilidad de discretizar el problema y conjuntar las ecuaciones de flujo con las de transmisión del calor y simular los mecanismos de transporte de la energía geotérmica, han resultado fundamentales en el avance de la calidad de la prospección.

En la actualidad son algo más de una decena los códigos numéricos desarrollados para este fin basados en métodos de diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Unos son de desarrollo académico y otro comercial, como el código TOUGH y sus diferentes módulos desarrollados por Berkeley Lab., pero la principal diferencia es el rango de temperaturas que admite el modelo: generalmente suelen basarse en los valores de las tablas de vapor y su límite de aplicación superior lo constituye el punto crítico del agua (374 °C y 221 bar).

Para que exista un yacimiento geotérmico de alta entalpía (200° -300 °C) a una profundidad accesible mediante sondeos (1.000 – 3.000 m),

es necesaria una fuente de calor próxima a la superficie que solo puede ser un cuerpo magmático (cámara, apófisis...). Su temperatura, si la erupción ha sido reciente, estará entre 900 ° y 1.200 °C en función de la composición petrológica de la lava. En el caso de que se trate de una erupción de cronología conocida, el propio modelo calculará su temperatura actual.

La petrología de las emisiones volcánicas permite calcular la temperatura y presión (profundidad) del cuerpo magmático en el momento de la erupción. La cantidad de los productos emitidos proporciona una estimación del volumen de la posible cámara. La geoquímica de fluidos indica su temperatura actual, y la geofísica determina la posición de la anomalía que genera. Son los datos más importantes a introducir en la modelización, pero si el software no admite temperaturas superiores al punto crítico, resultará muy comprometido modelizar el comportamiento de un almacén geotérmico a partir de una cámara magmática cuya temperatura y presión no se pueden introducir en el modelo. En realidad, hay técnicas indirectas, pero nunca tan fiables.

Solo hay cuatro códigos numéricos que admiten temperaturas de cámaras magmáticas: FISHERS (800 °C y 1000 MPa), CSMP (1.000 °C y 500 MPa), FEHM (1.500 °C sin indicación de presión) e HYDROTHERM (1.200 °C y 1.000 MPa). El más completo para trabajar con volcanismo es, sin duda, HYDROTHERM (Hayba, Ingebristen, 1994) desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS (<https://volcanoes.usgs.gov/software/hydrotherm/>) y de descarga libre.

Este método ha sido utilizado en casi cien publicaciones para simular grandes volcanes, campos geotérmicos asociados, fenómenos de subducción e incluso para modelizar los volcanes de Marte, lo que lo convierte en nuestra mejor opción. Una premisa importante para su aplicación en las islas Canarias, de naturaleza volcánica, debería ser que, con los mismos valores de parámetros térmicos e hidráulicos, se pudieran reproducir todos los fenómenos: los debidos a gradiente geotérmico normal (Gran Canaria, La Gomera...) y los generados por posibles cuerpos intrusivos magmáticos (Lanzarote, Tenerife o La Palma), bien sean en fase líquida o en fase vapor. La mejor manera de validar estos parámetros en estudios teóricos es conseguir ajustarlos sobre sondeos ya realizados con resultados concretos. Si sobre casos reales funcionan, su extrapolación

al concepto de prospección (geológica, geoquímica y geofísica) queda mucho más afianzado.

En este estudio se presentan dos ejemplos: uno sobre la isla de Gran Canaria y un segundo sobre Lanzarote, islas con un modelo geotérmico completamente opuesto. En ambos casos se han adoptado los siguientes parámetros generales relativos tanto a los basaltos como a los *cap-rock* arcillosos definidos por la MT:

| | Basaltos | Cap-rocks |
|--|--|-------------------|
| Conductividad térmica (W/m ² K) | 1,8 | |
| Calor específico (KJ/kg ² K) | 0,9 | 0,9 |
| Densidad (g/cm ³) | 2,6 | 2,5 |
| Permeabilidad (m ²) | 10 ⁻¹⁵ a 10 ⁻¹⁸ (dependiente de temperatura) | 10 ⁻¹⁸ |

2. Aplicación a la isla de Gran Canaria

Cuando después de la crisis energética de 1973 el IGME comenzó a investigar la geotermia de nuestro país con fondos provenientes de los sucesivos Planes Energéticos Nacionales (PEN), resultaba evidente que las islas Canarias eran buenas candidatas dada su naturaleza volcánica. Los autores de este artículo comenzaron también entonces su andadura en esta disciplina.

A finales de la década de los 70, Lanzarote y Tenerife, por este orden, eran las únicas islas donde el mundo académico, fundamentalmente el CSIC y la Facultad de Geología de la Complutense, habían dirigido sus miradas. A una cierta distancia estaba Gran Canaria, feudo investigador de los alumnos alemanes del Prof. Schmincke con excelentes trabajos de investigación, aunque no relacionados con este trabajo.

En 1976 y 1979 las ya desaparecidas empresas Compañía General de Sondeos y ENADIMSA llevaron a cabo sendos estudios geoquímicos de las aguas de los pozos de Gran Canaria, descubriendo que las mayores anomalías de equilibrios agua-roca se encontraban entre los barrancos de Tirajana y Agüimes, al este de la isla, con temperaturas máximas de 120 °C. Los resultados de ambas empresas fueron coincidentes.

En 1980 ENADIMSA decidió llevar a cabo dos sondeos de 700 m a rotopercusión en los dos lugares de Gran Canaria donde las anomalías térmicas eran cuantitativa y cualitativamente más importantes (Figura 1). El sondeo de Agüimes alcanzó los 648 m, con una temperatura de 66 °C y un gradiente geotérmico de 6,7 – 7,5 °C/100m. El sondeo de Tirajana llegó a los 670 m, con una temperatura de 64 °C y un gradiente de 6,2 – 6,5 °C/100m. Las formaciones atravesadas fueron los basaltos antiguos del edificio basal de la isla, en algunos tramos con pérdidas totales de circulación. La salinidad del agua se mantuvo entre 8.000 y 10.000 µS/cm.

Los gradientes geotérmicos encontrados de 6,6 a 7,5 °C resultaron el doble de los normales. Este resultado, junto con la alta permeabilidad de los basaltos antiguos, constituyeron excelentes indicios de las posibilidades geotérmicas, pero la prospección no fue retomada. Al igual que sucedió con el mundo académico, Tenerife y Lanzarote continuaron centrando la investigación y este hallazgo no se consideró prioritario.

En 2017 se obtuvo apoyo para dos proyectos dentro del Programa Estatal de I+D+i orientado a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación: Proyecto RTC-2017-6628-3 (ELECTROVOLCÁN): Diseño y desarrollo experimental de prototipos para la generación de electricidad mediante efecto termoeléctrico en anomalías geotérmicas superficiales de origen volcánico: Aplicación en los sistemas volcánicos de Timanfaya (Lanzarote) y Teide (Tenerife), y Proyecto RTC-2017-66287-3 (TERMOVOLCÁN): Diseño y desarrollo experimental de una metodología multiparamétrica para la exploración de recursos geotérmicos ocultos de alta entalpía en Canarias. Gracias a la financiación de estos proyectos, se han investigado de nuevo las islas de Gran Canaria, Lanzarote, Tenerife y La Palma. Este artículo resume algunos de los resultados de las tres primeras.

Respecto a Gran Canaria, se puede decir que es una isla que ha completado ya su historia volcánica e iniciado su fase de desmantelamiento. El último volcanismo que ha tenido lugar es de tipo basáltico y basaltos alcalinos de origen mantélico, generados entre 17 y 22 km de profundidad (Aulinas *et al.*, 2010). Este volcanismo tardío ha dado lugar a edificios estrombolianos de hasta 250 m de altura y tiene una edad entre 12.000 y 2.000 años. El volumen de lavas emitido

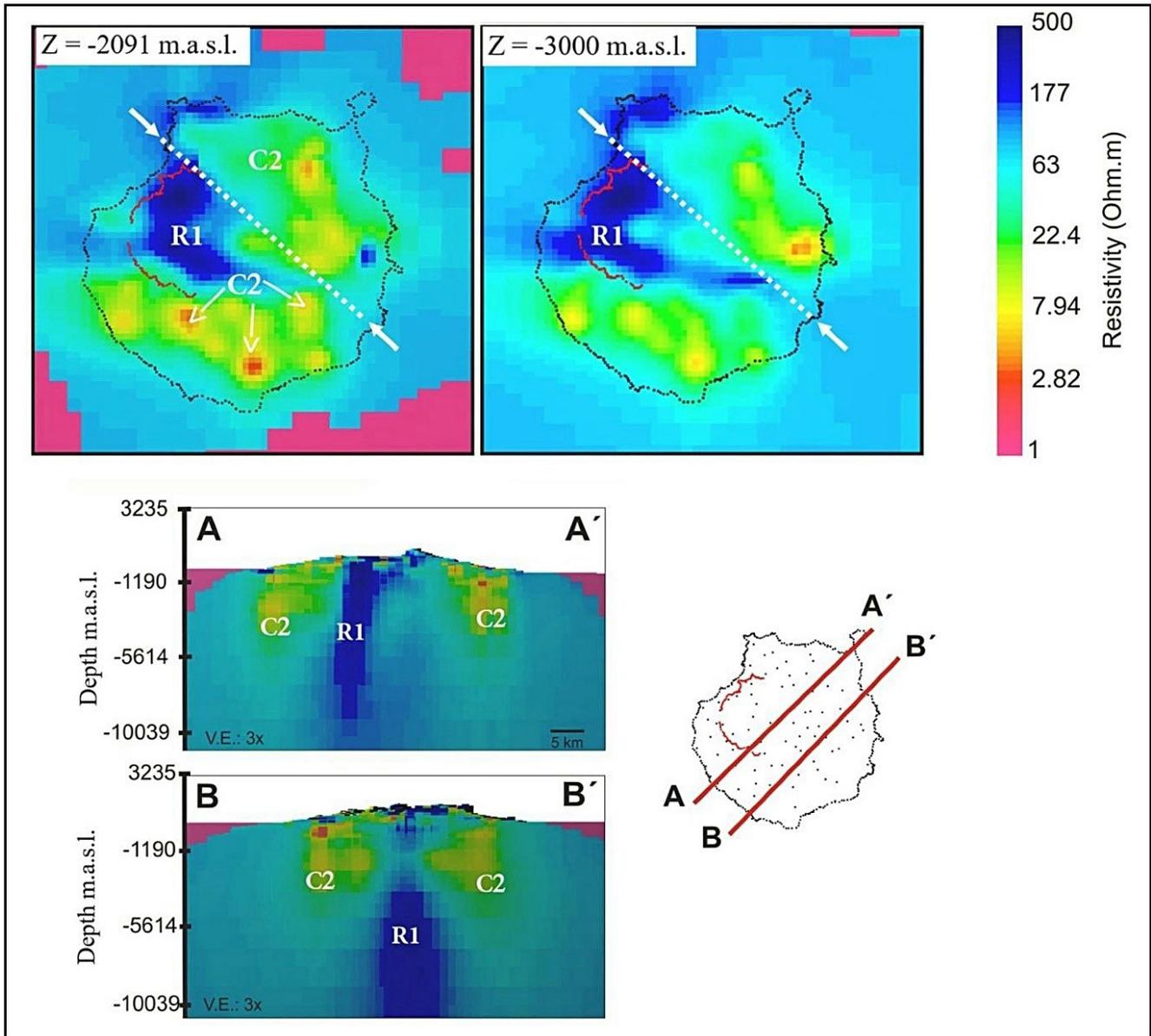


Figura 2. Gran Canaria. Perfiles de MT NE-SW (Ledo *et al.*, 2021).

Figure 2. Gran Canaria NE-SW MT profiles (Ledo *et al.*, 2021).

alturas centrales hacia el perímetro costero. El flujo de infiltración profunda que circula por los basaltos antiguos del primitivo escudo volcánico, calentado por gradiente geotérmico normal, está obligado a salir por la zona costera a través de la interfase con el agua salada que es la que controla su salida. En esta zona de convergencia se concentran las líneas de flujo profundas y las superficiales, las primeras calientes y las segundas frías. El gradiente geotérmico en la zona costera, por tanto, debe incrementarse al confluir en el mismo espacio todas ellas.

El código HYDROTHERM es capaz de simular esta realidad combinando ecuaciones de flujo de

agua con las de transmisión del calor. Para ello, se han transferido al modelo Hydrotherm los perfiles de MT NW-SE que pasan por los sondeos (Figura 3) y se ha modelado el paso del tiempo hasta alcanzar el estado estacionario. El resultado (Figura 4) muestra cómo las líneas de flujo y las isothermas se concentran en la zona costera, incrementando el gradiente. Además, el perfil del sondeo de 650 m se corresponde con la temperatura encontrada durante la perforación. Este hecho puede tener unas grandes repercusiones económicas en la isla, dado que toda la industria, agricultura, hoteles y desaladoras se encuentran en la zona costera.

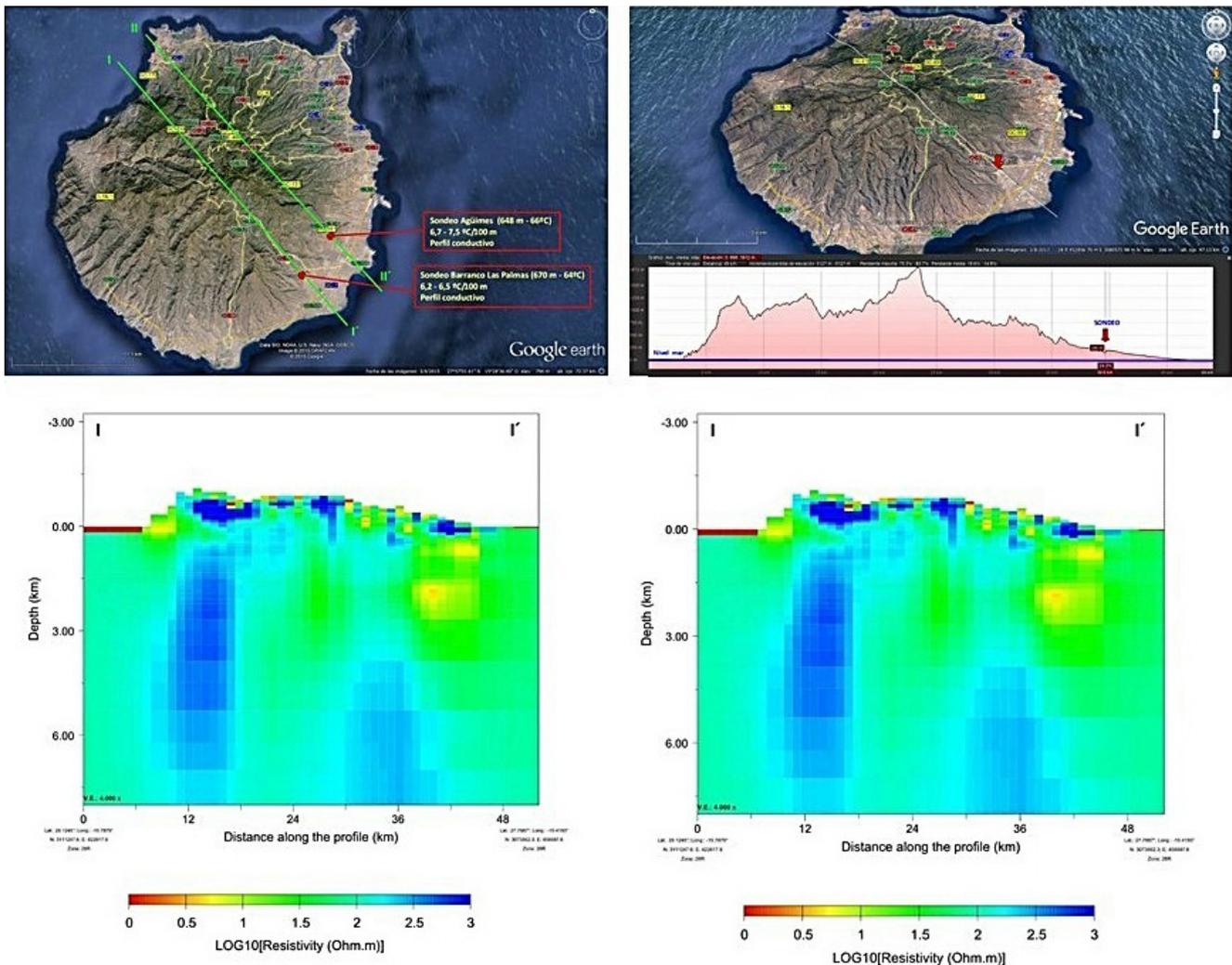


Figura 3. Perfiles de MT NW-SE sobre los dos sondeos geotérmicos (Ledo, J. comunicación personal).

Figure 3. NW-SE MT profiles over the two geothermal wells (Ledo, J. personal communication).

3. Aplicación a la isla de Lanzarote

La justificación de las anomalías térmicas de Timanfaya (hasta 610 °C a 13 m de profundidad) han sido objeto de muchos estudios que se iniciaron por el IGME (Cordón, 1949) y, desde los años 70, fundamentalmente por el CSIC y el IGME (Calamai and Ceron, 1970; Araña *et al.*, 1973; Araña and Panichi, 1974; Tonani, 1977; Araña and Barberi, 1984; Albert *et al.*, 1989, 1994).

Los resultados obtenidos, sobre todo los 613 °C a 1 m de profundidad, resultaban tan espectaculares que el IGME decidió perforar un sondeo de 3000 m basado en los datos recopilados previamente:

- a) La sísmica marina que llevó a cabo ENADIMSA alrededor de la isla en 1975 puso de manifiesto que Lanzarote se había for-

mado y crecido apoyada sobre la plataforma sahariana carbonatada a una profundidad aproximada de 3.000 m

- b) Los sorprendentes resultados de los primeros análisis de isótopos estables (^{18}O y Deuterio ^2H) que se llevaron a cabo en el Islote de Hilario, cuyo resultado de deriva del ^{18}O era y sigue siendo el mayor conocido (Araña and Panichi, 1974). Este fraccionamiento isotópico solo se podía justificar por evaporación a altísima temperatura de un almacén carbonatado saturado con agua marina. El modelo geoquímico era totalmente compatible con el hallazgo geofísico.
- c) La zona de anomalías térmicas se situaba sobre la gran fisura eruptiva septentrional de la isla (WSW – ESE) que generó la gran fase eruptiva de 1730-36 y la menor de 1824.

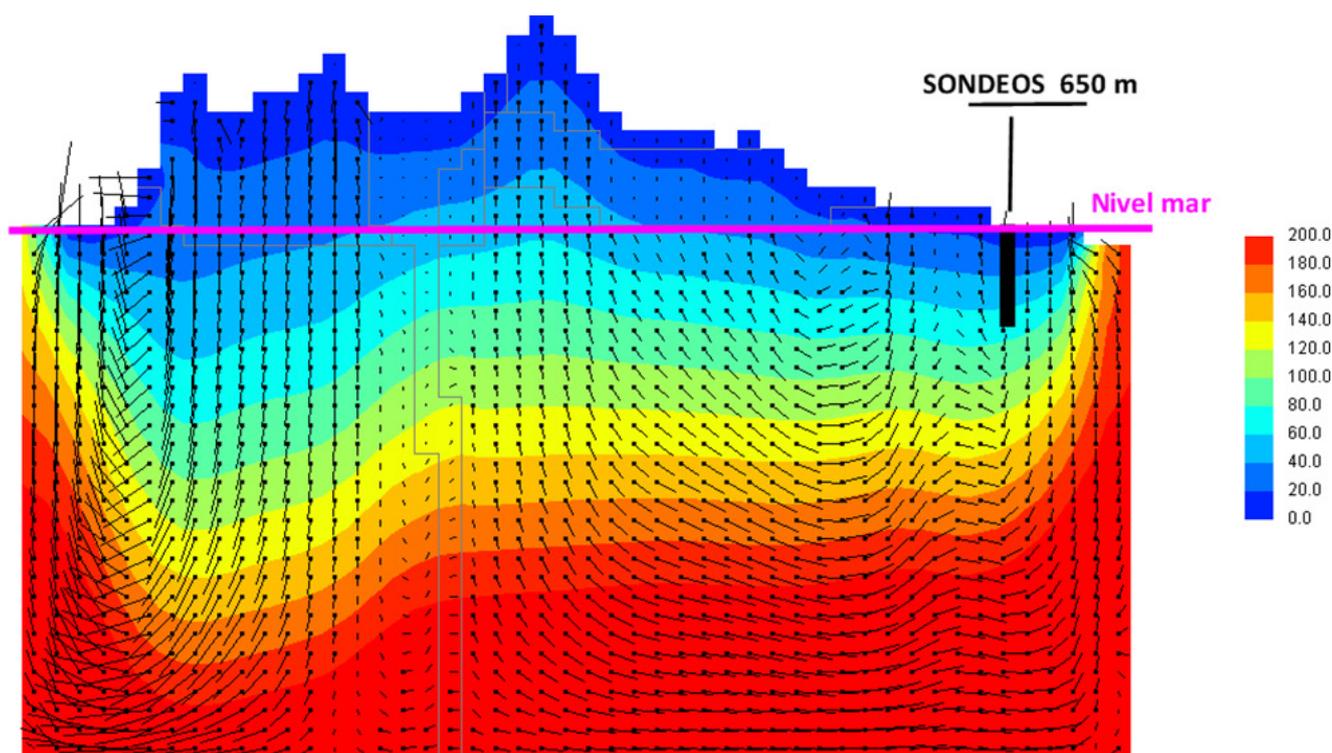


Figura 4. Gran Canaria. Simulación de las isothermas y vectores de flujo en estado estacionario (IGME, 2021).

Figure 4. Gran Canaria. Simulation of isotherms and flow vectors in steady state (IGME, 2021).

Los objetivos eran: encontrar el substrato carbonatado de la isla entre 2.000 y 3.000 m de profundidad de acuerdo con los datos sísmicos obtenidos, comprobar si constituía un acuífero de agua marina y verificar la existencia de temperaturas compatibles con un yacimiento de alta entalpía.

El sondeo se situó, con buen criterio, sobre la fisura eruptiva de 1730-36 entre los edificios Montaña Rajada (con conocidas anomalías térmicas superficiales) y Tremesana (Figura 5). Se perforó entre agosto y diciembre de 1977 y finalizó a los 2.702 m de profundidad penetrando 100 m en las calizas del talud continental. Se verificó la geología determinada por la sísmica marina, pero no se cumplieron las expectativas geotérmicas.

La temperatura alcanzó 30 °C en el primer centenar de metros, 39 °C a 1.000 m, 63 °C a 2.000 m y finalizó con una temperatura a fondo de pozo (BHT-*bottom hole temperature*) de 90 °C a 2.702 m, sin haber interceptado indicio de vapor alguno. Este perfil térmico implica un gradiente geotérmico de 2,6 °C/100 m, es decir, un gradiente incluso algo inferior al normal. Sin duda, este resultado contribuyó notablemente al escaso interés de la Administración española por la geotermia, que prosigue hoy en día en muchos sectores a pesar de la nueva política energética en apoyo de las renovables.

Cuarenta y cinco años después, las técnicas de modelización vienen a darnos luz sobre lo que sucedió, cuando el planteamiento y el modelo geológico eran del todo correctos. Se ha realizado el modelo partiendo de los parámetros de roca y condiciones de contorno conocidos hasta el momento y simulando el paso de 246 años, correspondiente al tiempo transcurrido entre la erupción de Montaña Rajada (1731) y la ejecución del sondeo (1977), se obtiene el modelo de esta isla.

En la Figura 6 se indica el detalle del emplazamiento del sondeo. Se sitúa sobre la fisura eruptiva en la falda SW de Montaña Rajada (fase volcánica de 1730-36) y el volcán Tremesana, de edad pleistocena, que a su vez tiene un pequeño cono del S. XVIII. Todos estos edificios se incluyeron en el modelo con todo detalle.

La Figura 7 constituye la resolución del modelo, una vez transcurridos 246 años. Se observa la distribución de isothermas comparada con los datos reales medidos en el sondeo, prácticamente coincidentes, y el modelo de flujo obtenido (Figura 8). En un régimen convectivo como el que existe en este caso, entre los dos volcanes “calientes” se genera una rama fría descendente que forma parte de la convección de los primeros. Además, el modelo determina (Figura 9) un

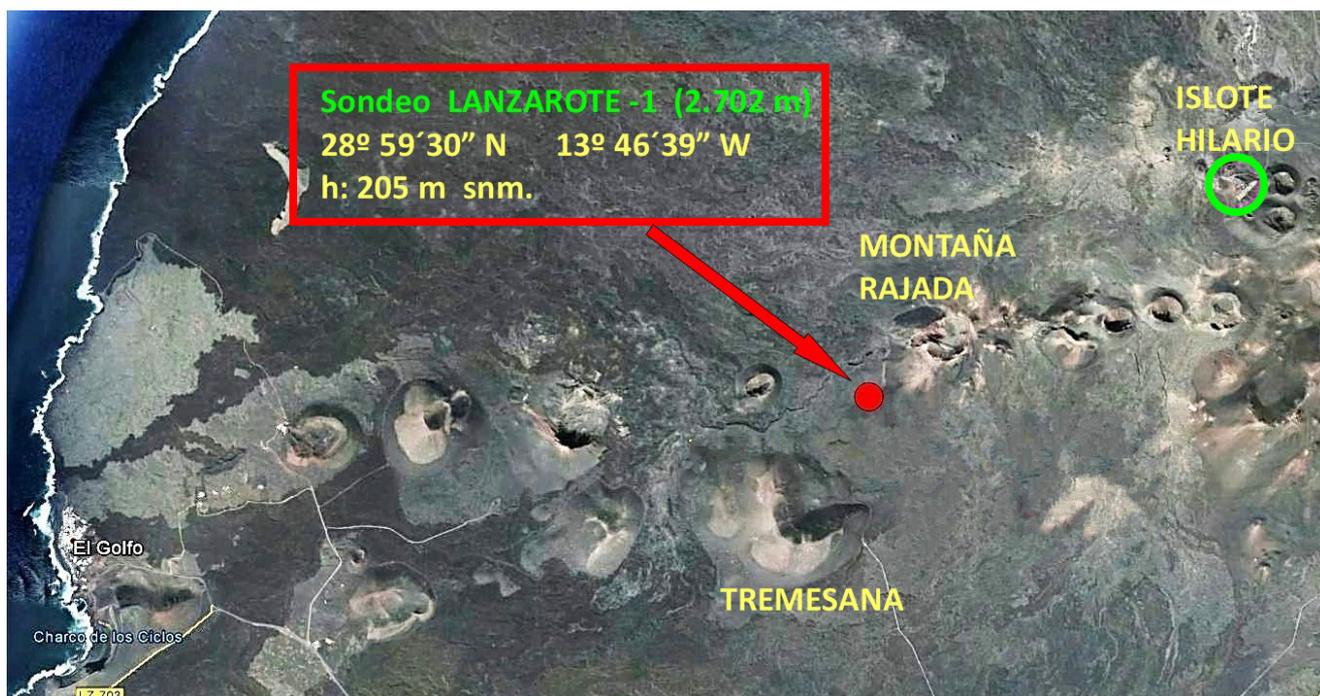


Figura 5. Situación del sondeo geotérmico Lanzarote-1 en 1977.

Figure 5. Location of the Lanzarote-1 geothermal well in 1977.

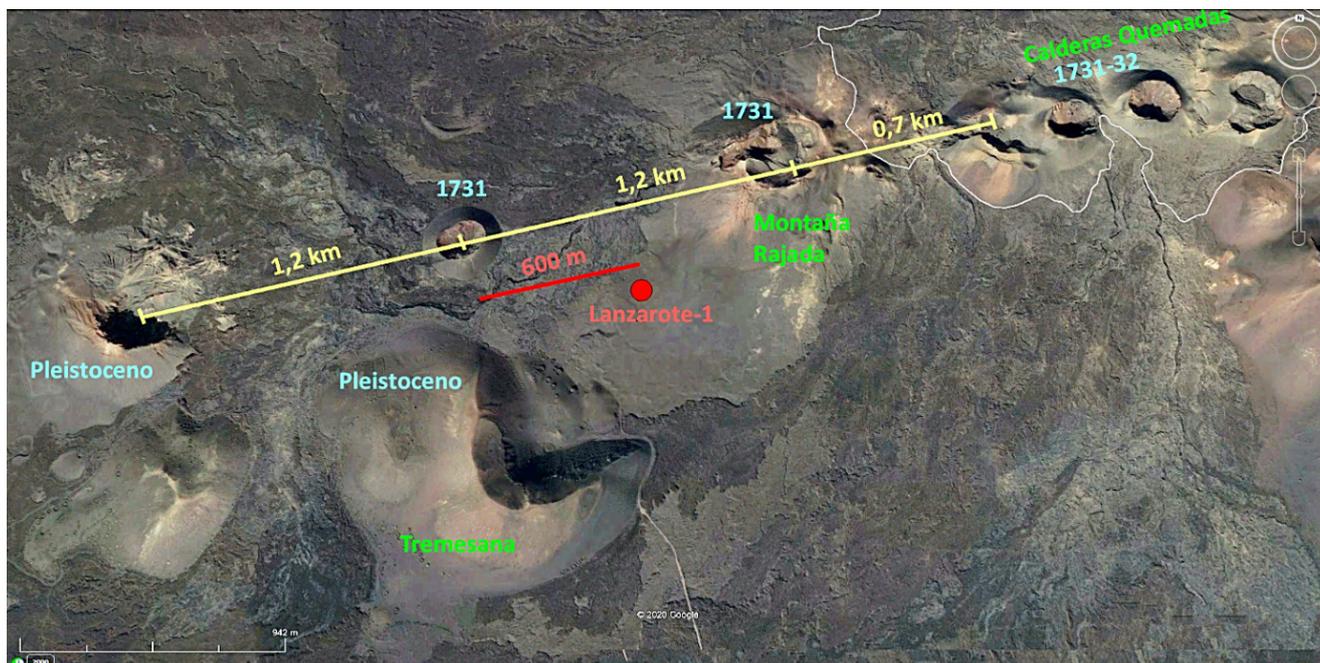


Figura 6. Situación del sondeo geotérmico Lanzarote-1 respecto a los centros de emisión volcánica.

Figure 6. Situation of the Lanzarote-1 geothermal well with regard to the volcanic emission centers.

reservorio de vapor supercrítico 500 m por debajo de la cota de finalización del sondeo. El éxito estaba ahí, pero nos quedamos cortos por falta de unas herramientas de cálculo de las que ahora disponemos.

4. Aplicación a la isla de Tenerife

Se describe por último una aplicación de este código a la geotermia de la isla de Tenerife, no apoyada por sondeos, sino por otro gran trabajo

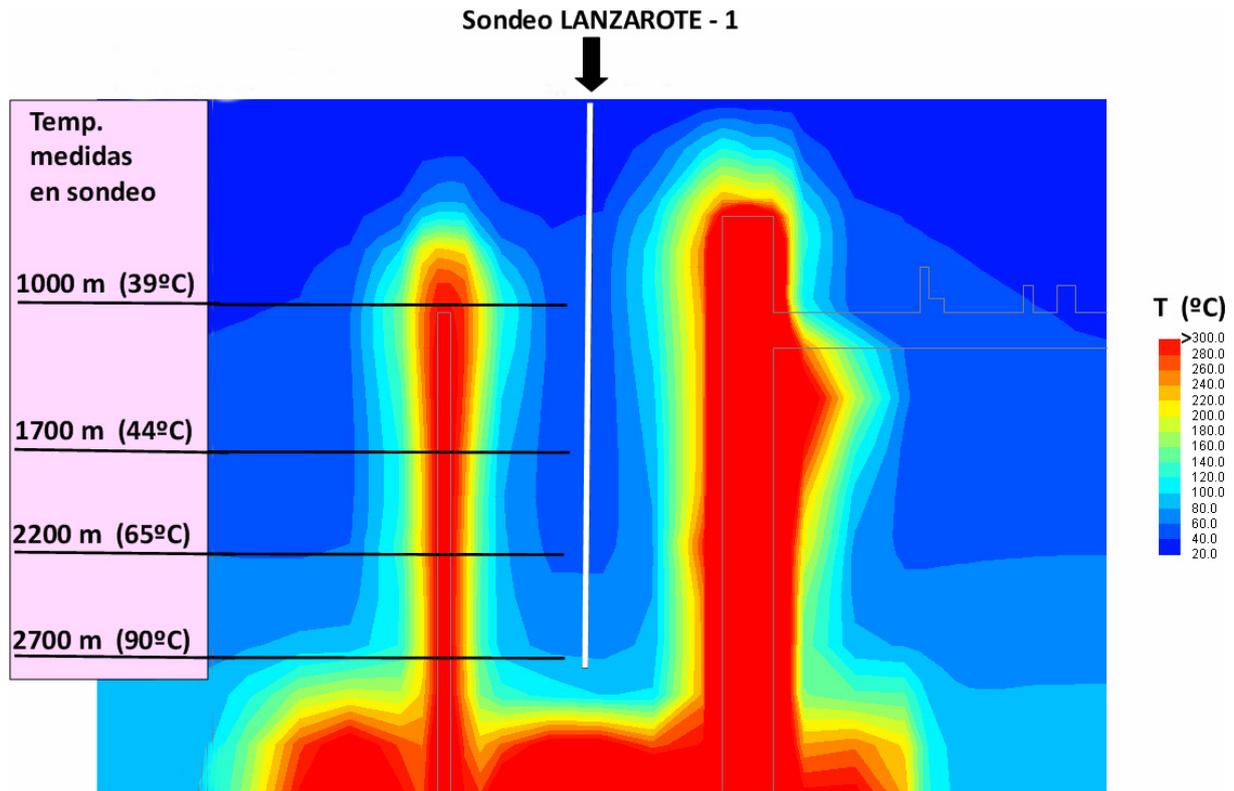


Figura 7. Modelo térmico del sondeo Lanzarote-1.

Figure 7. Thermal model of the Lanzarote-1 well.

ISOTERMAS Y VECTORES DE FLUJO

t = 246 años

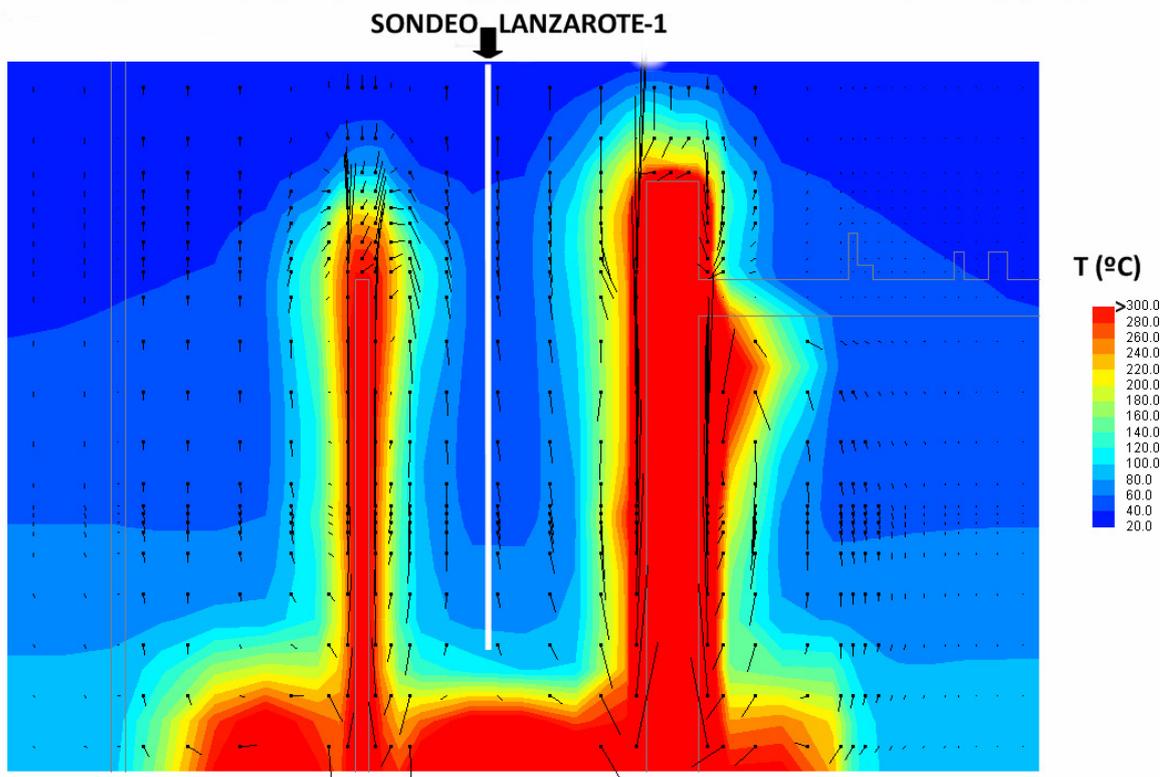


Figura 8. Isothermas y vectores de flujo del sondeo Lanzarote-1.

Figure 8. Isotherms and flow vectors of the Lanzarote-1 well.

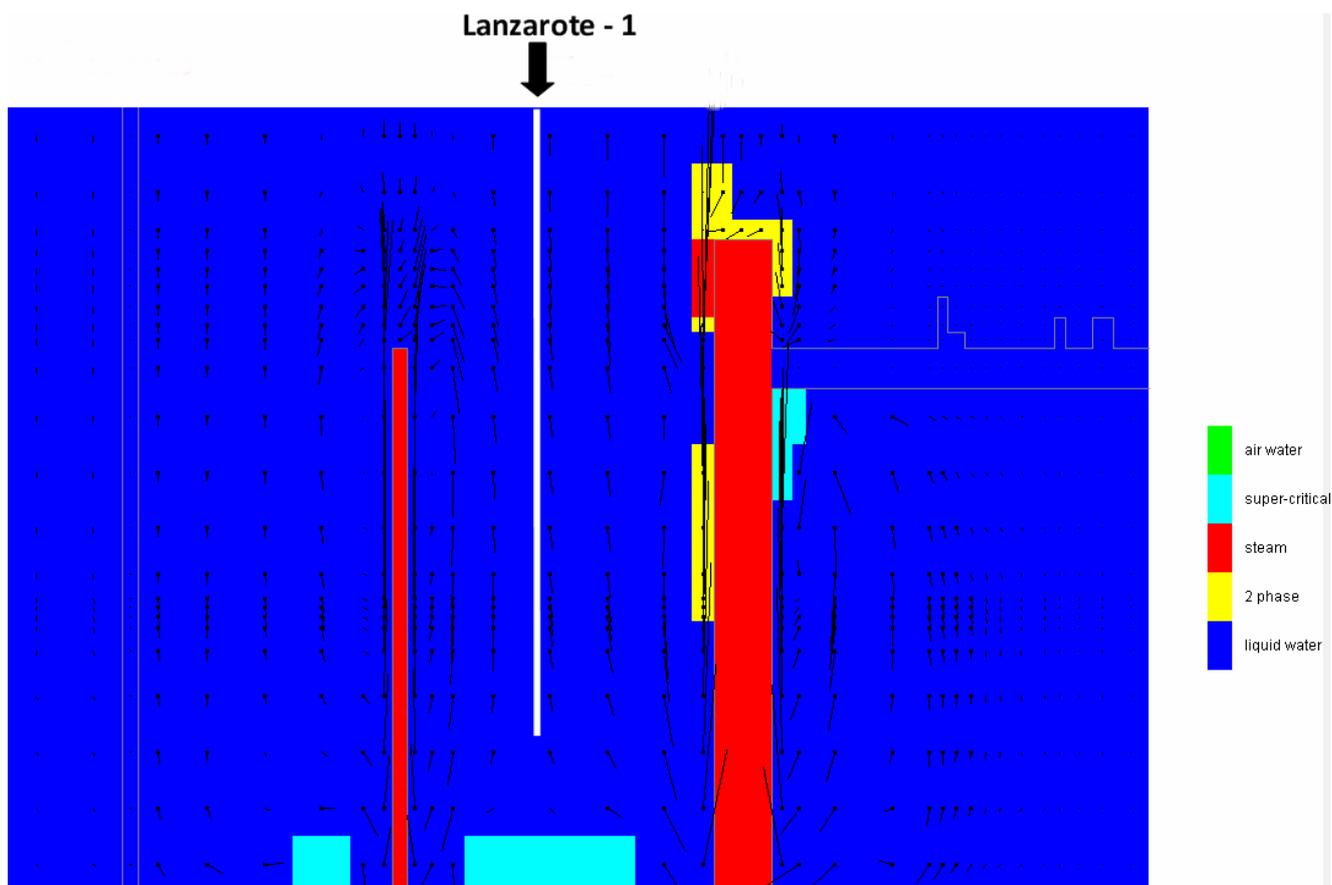


Figura 9. Fases termodinámicas del sondeo Lanzarote-1.

Figure 9. Thermodynamic phases of the Lanzarote-1 well.

de geofísica. El Teide y la caldera de Las Cañadas han sido objeto de numerosos estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos desde la década de los 70 del pasado siglo. Todos los estudios convergen en suponer la presencia de cámaras magmáticas someras aproximadamente a nivel de mar, deducidas por geotermometría y geobarometría mineralógica de las lavas diferenciadas emitidas. Se han publicado muchas hipótesis sobre el número y conexión de cámaras someras: Araña and Barberi (1984) abogan por una única cámara somera del Teide alimentada por otra máfica inferior; Ablay *et al.* (1995) suponen también una única cámara somera que alimentaría Pico Viejo y Montaña Blanca; Triebold *et al.* (2006) opinan que el Teide y Montaña Blanca compartirían la misma cámara, mientras Pico Viejo tendría la suya propia; Andújar *et al.* (2008, 2010, 2012a, 2012b y 2013) suponen cámaras separadas para cada volcán pero alimentadas por la central del Teide. No obstante, hasta el día de hoy ninguna técnica geofísica (gravimetría, magnetometría, MT, dispersión y velocidad de las on-

das P, etc.) ha sido capaz de evidenciarlas. De Barros *et al.* (2012) intentaron buscar imágenes de almacenamiento de magma bajo el edificio del Teide utilizando campos de dispersión de ondas P sin éxito; Piña Varas *et al.* (2014 y 2018) justifican la falta de detectabilidad mediante la MT, por ser pequeñas respecto a la densidad de estaciones de medida ejecutadas.

Ante esta incertidumbre, se han modelizado con HYDROTHERM cada una de las hipótesis publicadas, sin posibilidad de apoyo inequívoco de las técnicas geofísicas convencionales para inclinarse por la potencialmente más próxima a la realidad... aunque hay una excepción.

En 2014 se llevó a cabo un importante trabajo sobre la aplicación del método de potencial espontáneo (SP) en la caldera de las Cañadas, con el fin de determinar la dirección de los flujos hidráulicos (Villasante-Marcos *et al.*, 2014). La importancia del estudio radica en las numerosas instituciones que participaron: IGN, ICTJA-CSCIC (Barcelona), Instituto de Física del Globo (París), INGV (Palermo y Roma), UFZ (Leipzig) y

MEMSFIELD (Francia) y en el gran volumen de datos adquiridos. Se midieron un total de 11.911 estaciones de SP con un espaciado de 20 m, repartidas en un total de 237 km de perfiles de dos tipos: radiales desde las cumbres del Teide y Pico Viejo y circulares en el interior de la caldera de Las Cañadas y alrededor del flanco norte del complejo Teide-Pico Viejo. El trabajo se llevó a cabo en siete campañas de campo repartidas entre 2007 y 2011.

Los resultados de este completísimo estudio con una técnica geofísica que no suele ser común en geotermia se refleja en la Figura 10. Entre los diversos modelos HIDROTHERM construidos con las diferentes hipótesis de cámaras anteriormente referidas, uno resulta exactamente coincidente con los flujos deducidos por la SP, y es el que considera que Pico Viejo, Teide y Montaña Blanca poseen cámaras separadas a nivel de mar (Figura 11). Un nuevo ejemplo, una vez más, de la complicidad entre las técnicas geofísicas y la modelización.

5. Conclusiones

El código HYDROTHERM del USGS es una herramienta muy utilizada en la modelización geotérmica y en este estudio se ha mostrado

como imprescindible para entender y justificar resultados previos de prospección geológica, geoquímica y, sobre todo, geofísica y de sondeos mecánicos, que el IGME y otros entes académicos habían aplicado previamente en las islas Canarias.

Su potencialidad demostrada aconseja utilizarlo siempre como herramienta integradora antes de decidir la implantación de posibles sondeos geotérmicos de reconocimiento profundo. Por otra parte, ha sido posible validarlo según diferentes condicionantes: gradiente geotérmico normal, presencia de cámaras magmáticas, circulación de diferentes fases termodinámicas, posibles enfriamientos inducidos por dispositivos termoeléctricos (Lanzarote), etc. Para nosotros ya resulta un elemento integrador imprescindible.

Agradecimientos

Esta publicación ha sido posible gracias a dos programas RETOS:

- (a) ELECTROVOLCÁN. Proyecto RTC-2017-6628-3: Diseño y desarrollo experimental de prototipos para la generación de electricidad mediante efecto termoeléctrico en anomalías geotérmicas superficiales de

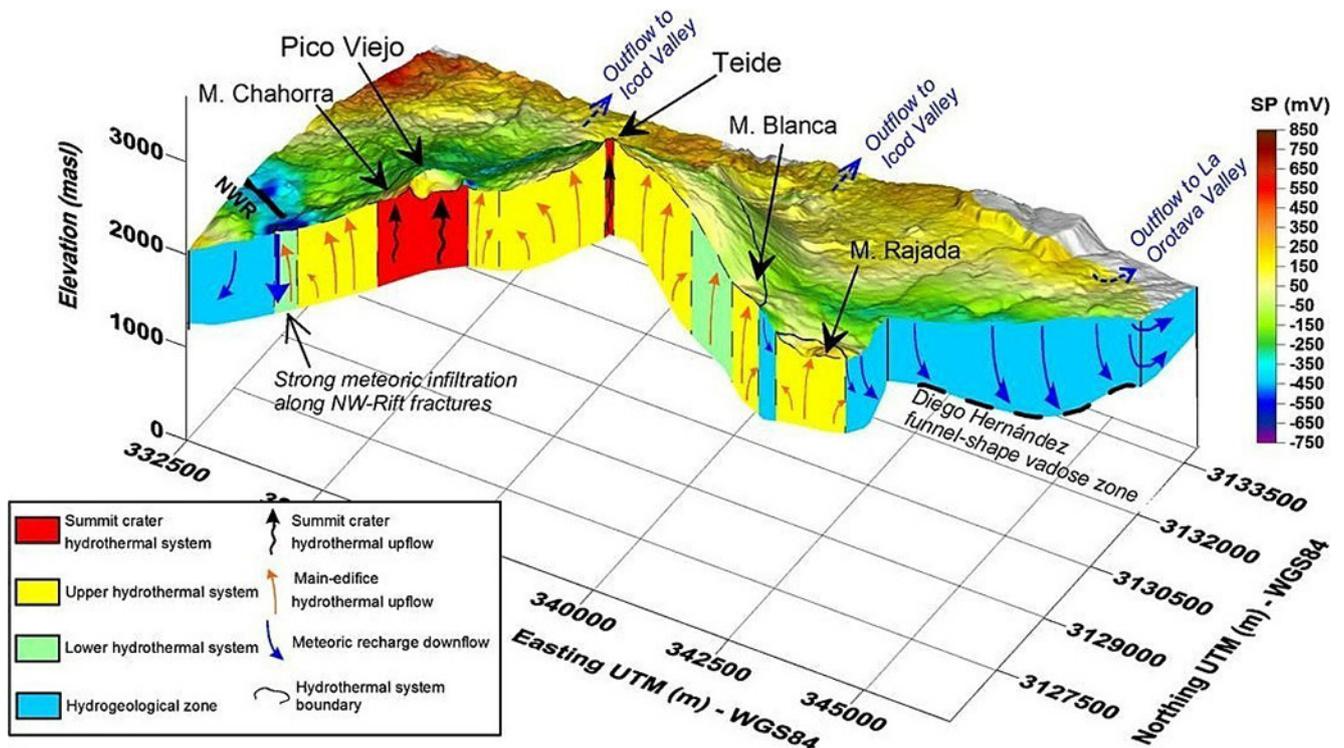


Figura 10. Sección 3D de los flujos hidráulicos obtenidos mediante SP en la caldera del Teide (Villasante *et al.*, 2014).

Figure 10. 3D section of the hydraulic flows obtained by means SP in the Teide caldera (Villasante *et al.*, 2014).

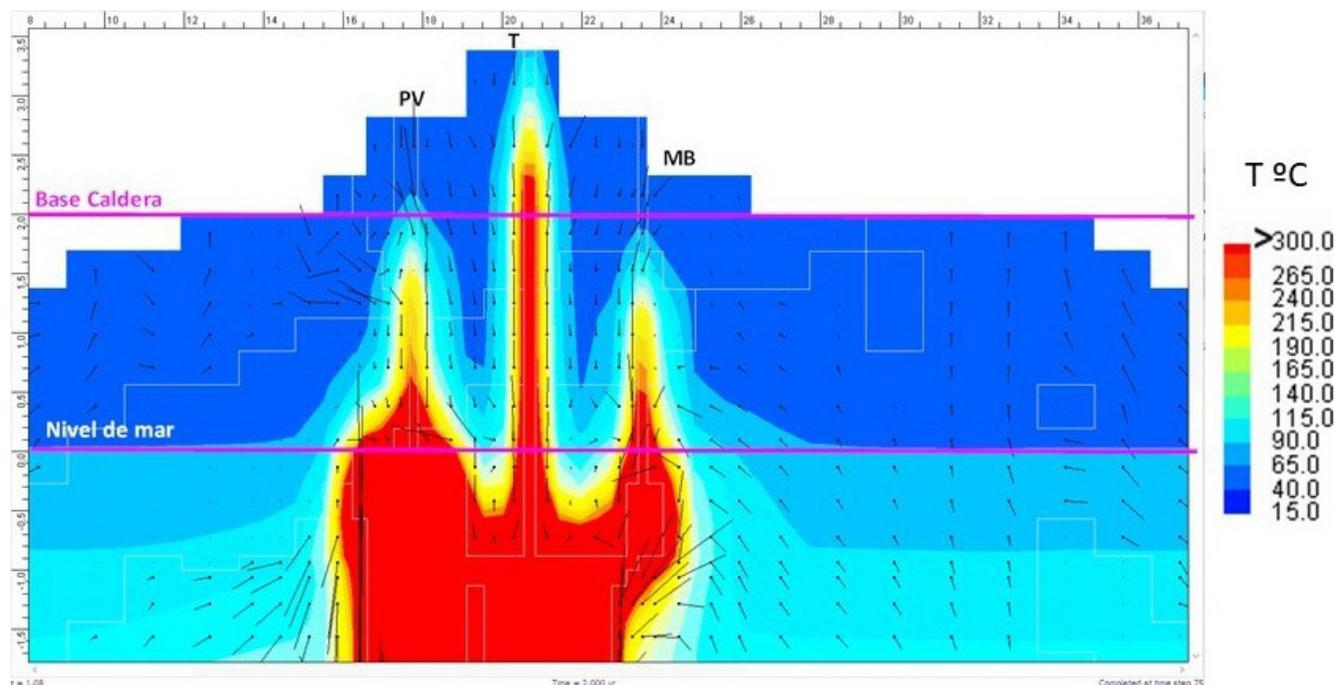


Figura 11. Isothermas y vectores de flujo del modelo geotérmico del sistema Pico Viejo-Teide-Montaña Blanca con cámaras separadas.

Figure 11. Isotherms and flow vectors of the Pico Viejo-Teide-Montaña Blanca system geothermal model with separate chambers.

origen volcánico: Aplicación en los sistemas volcánicos de Timanfaya (Lanzarote) y Teide (Tenerife).

- (b) TERMOVOLCÁN. Proyecto RTC-2017-66287-3: Diseño y desarrollo experimental de una metodología multiparamétrica para la exploración de recursos geotérmicos ocultos de alta entalpía en Canarias.

Referencias

- Ablay, G. J., Ernst, G. G. J., Martí, J., and Sparks, R. S. J. (1995). The 2ka subplinian eruption of Montaña Blanca, Tenerife. *Bulletin Volcanologique*, 57, 337-355.
- Albert, J. F., Díez Gil, J. L., and Valentín, A. (1989). Shallow HDR geothermal field in Lanzarote. Potential evaluation and heat extraction tests. *ESF Meeting on Canarian Volcanism*. Lanzarote, 300-302.
- Albert, J. F., Díez Gil, J. L., Valentín, A., and Torres, F. (1994). Evaluación de las anomalías geotérmicas de Lanzarote. *Serie Casa de los Volcanes, In memoriam Dr. José Luis Díez Gil*, 3, 41-60.
- Andújar, J., Costa, F., Martí, J., Wolff, J. A., and Carroll, M. R. (2008). Experimental constraints on pre-eruptive conditions of phonolitic magma from the caldera-forming El Abrigo eruption, Tenerife (Canary islands). *Chemical Geology*, 257, 173-191.
- Andújar, J., Costa, F., and Martí, J. (2010). Magma storage conditions of the last eruption of Teide volcano (Canary Islands, Spain). *Bulletin of Volcanology*, 72, 381-395.
- Andújar, J., and Scaillet, B. (2012a). Experimental constraints on parameters controlling the difference in the eruptive dynamic of phonolitic magmas: the case from Tenerife (Canary Islands). *Journal of Petrology*, 53(9), 1777-1806. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/EGS033>.
- Andújar, J., and Scaillet, B. (2012b). Relationships between pre-eruptive conditions and eruptive styles of phonolite-trachyte magmas. *Lithos*, 152, 122-131.
- Andújar, J., Costa, F., and Scaillet, B. (2013). Storage conditions and eruptive dynamics of central versus flank eruptions in volcanic islands: the case of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 260, 62-79.
- Araña, V., Ortiz, R., and Yuguero, J. (1973). Thermal anomalies in Lanzarote (Canary Islands). *Geothermics*, 2-2, 73-75.
- Araña, V., and Panichi, C. (1974). Isotopic composition of steam samples from Lanzarote, Canary Islands. *Geothermics*, 3-4, 142-145.
- Araña, V., and Barberi, F. (1984). *Prospección Geotérmica de la Caldera del Teide*. Estudio Geovolcanológico. IGME, 93 pp.
- Araña, V., Díez, J. L., Ortiz, R., and Yuguero, J. (1984). Convection of geothermal fluids in the Timanfaya

- volcanic area. *Bulletin of Volcanology*, 47(3), 667-677.
- Aulinas, M. (2008). The plio-quadernary volcanism (4 MA-to recent) in Gran Canaria (Canary Islands, Spain): mantle sources and magma evolution. Tesis Universidad de Barcelona.
- Aulinas, M., Gimeno, D., Fernandez-Turiel, J. L., Pérez Torrado, F. J., Rodríguez González, A., and Gasperini, D. (2010). The Plio-Quaternary magmatic feeding system beneath Gran Canaria (Canary Islands, Spain): constraints from thermobarometric studies. *Journal of the Geological Society, London*, 167, 785–801. <https://doi.org/10.1144/0016-76492009-184>.
- Barrera, J. L., and García Moral, R. (2011). Mapa geológico de Canarias. GRAFCAN. Sta. Cruz de Tenerife.
- De Barros, L., Martini, F., Bean, C. J., Garcia-Yeguas, A., and Ibáñez, J. (2012). Imaging magma storage below Teide volcano (Tenerife) using scattered seismic wavefields. *Geophysical Journal International*, 191, 695–706.
- Blanco-Montenegro, I., Torta, J. M., García, A., and Araña, V. (2003). Analysis and modelling of the aeromagnetic anomalies of Gran Canaria (Canary Islands). *Earth and Planetary Science Letters*, 206(3), 601-616. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01129-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01129-9).
- Calamai, A., and Ceron, P. (1970). Air convection within Montaña del Fuego (Lanzarote Island, Canarian Archipelago). U.N. Symposium on Development & Utilization of Geothermal Resources, Pisa, *Geothermics*, sp. issue, 2 (2), 21.
- Camacho, A. G., Montesinos, F.G., and Vieira, R. (2000). Gravity inversion by means of growing bodies. *Geophysics*, 65(1), 95–101.
- Camacho, A., Montesinos, F. G., Vieira, R., and Arno, J. (2001). Modelling of crustal anomalies of Lanzarote (Canary Islands) in light of gravity data. *Geophysical Journal International*, 147(2), 403-414.
- Carracedo, J. C., Pérez Torrado, F. J., and Hansen, A. (2007). El relieve de las Islas Canarias. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(2), 196-205.
- Carracedo, J. C., and Troll, V. (2016). *The Geology of the Canary Islands*. Elsevier.
- CEE (2013). Shallow HDR geothermal field in Lanzarote -Canary Islands-. Potential evaluation and heat extraction tests. Proyecto JOULE CT90-0004. Bruselas. DG. XII Science, Research and Development. Inédito.
- Cordón López de Ocáriz, T. (1949). - Informe sobre las posibilidades que hay de aprovechar el calor de la Montaña de Fuego de la Isla de Lanzarote. IGME Informe interno.
- ENADIMSA (1981). Estudio del gradiente geotérmico en zonas anómalas de Gran Canaria-Informe final. Madrid.
- 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, 18181. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75001-z>.
- Diez, J. L., Yuguero, J., Ortiz, R., and Araña, V. (1986). Termometrías y modelos matemáticos para el estudio de gradientes térmicos superficiales en Lanzarote (Islas Canarias). Aplicación a las raíces de Timanfaya (Lanzarote). *Anales de Física. Serie B*, 82. Número especial 1(213), 91-101.
- Diez, J. L., Araña, V., Ortiz, R., and Yuguero, J. (1987). Stationary convection model for heat transfer by means of geothermal fluids in post eruptive systems. *Geothermics*, 16(1), 77-89.
- García, A. (1986). Estudio MT del área volcánica de Timanfaya (Lanzarote). *Anales de Física. Serie B*, 82. Número especial 1(213), 35-43.
- Hayba, D. O., and Ingebritsen, S. E. (1994). The computer model HYDROTHERM, a three dimensional finite - difference model to simulate ground - water flow and heat transport in the temperature range of 0° to 1, 200°C, USGS Water Resources Investigations Report, 94 - 4045.
- Ledo, J., García-Merino, M., Larnier, H., Slezak, K., Piña-Varas, P., Marcuello, A., Queralt, P., Pérez, N. M., Schmincke, H. U., and Sumita, M. (2020). 3D electrical resistivity of Gran Canaria Island using Magnetotelluric data. *Geothermics*, 89, 101945. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101945>.
- Krastel, S., and Schmincke, H. U. (2002). Crustal structure of northern Gran Canaria, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115(1), 151-177. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00313-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00313-4).
- Piña-Varas, P., Ledo, J., Queralt, P., Marcuello, A., Bellmunt, F., Hidalgo, R., and Messeiller, M. (2014). 3D magnetotelluric exploration of Tenerife geothermal system (Canary Islands, Spain). *Surveys in Geophysics*, 35(4), <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9280-4>.
- 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 Space*, 70(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0783-y>.
- Ploessel, M. R. (1982). Ghyben-herzberg ratio. In: *Beaches and Coastal Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, New York.
- Sánchez Guzmán, J., and Abad, J. (1986). Sondeo geotérmico Lanzarote-1. Significado geológico y geotérmico. *Anales de Física. Serie B*, 82. Número especial 1-213, 102-109.
- Triebold, S., Kronz, A., and Wörner, G. (2006). Anorthite-calibrated backscattered electron profiles, trace elements and growth textures in feldspars from

- the Teide - Pico Viejo volcanic complex (Tenerife). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154, 117-130.
- Rodríguez-González, A., Perez-Torrado, F. J., Fernandez-Turiel, J. L., Aulinas, M., Paris, R., and Moreno-Medina, C. (2018). The Holocene volcanism of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Journal of Maps*, 14(2), 620–629. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1526717>.
- Tonani, F. (1977). Geochemical-Geothermal evaluation of thermal manifestations in the Montañas de Fuego, Lanzarote. Inédito.
- Valentín, A. (1988). La fase gaseosa relacionada con la actividad volcánica y tectónica. Tesis Doctoral Univ. de Barcelona.
- Villasante-Marcos, V., Finizola, A., Abella, R., Barde-Cabusson, S., Blanco, M. J., Brenes, B., Cabre-
ra, V., Casas, B., de Agustín, P., di Gangi, F., Domínguez, I., García, O., Gomis, A., Guzmán, J., Iribarren, I., Levieux, G., López, C., Luengo-Oroz, N., Martín, I., Moreno, M., Meletlidis, S., Morin, J., Moure, D., Pereda, J., Ricci, T., Romero, E., Schütze, C., Suski-Ricci, B., Torres, P., and Trigo, P. (2014). - Hydrothermal system of Central Tenerife Volcanic Complex, Canary Islands (Spain), inferred from self-potential measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 272, 59-77.
- Yuguero, J., Araña, V., Diez, J. L., and Ortiz, R. (1986). Evolución térmica de cámaras magmáticas. Aplicación a las raíces de Timanfaya (Lanzarote). *Anales de Física. Serie B*, 82. Número especial 1(213), 15-22.