

**Grado de Geografía y Ordenación del Territorio  
Curso Académico 2023-2024**

# **La energía geotérmica en Canarias: Avances recientes y análisis de superficie en el sur de Tenerife**

**Trabajo realizado por: Nast Mora González**

**Tutores: Víctor Bello Rodríguez y Luca D'Auria**



## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento especial a Luca D'Auria y a todo el equipo de INVOLCAN por su orientación experta durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Sus conocimientos y sugerencias fueron fundamentales para alcanzar los resultados presentados en este trabajo.

Deseo agradecer a Víctor Bello Rodríguez por proporcionar los recursos y facilidades necesarias para la realización de este estudio. La infraestructura y el acceso a bibliografía especializada fueron fundamentales para llevar a cabo esta investigación de manera exitosa.

Por último, dedico este trabajo a Ainhoa Cruz Gómez, cuya visión y motivación fueron el motor que impulsó este estudio. Su ejemplo de dedicación y compromiso fueron la fuente de inspiración para enfrentar cada etapa de este TFG.

## INDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	10
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	11
3.1 La energía geotérmica.....	11
3.1.1 Tipos de yacimientos.....	13
3.1.2 Tipos de plantas geotérmicas.....	15
3.1.3 Problemas derivados de la explotación geotérmica.....	16
3.1.4 Beneficios de la Geotermia.....	18
3.2 La geotermia en Canarias.....	18
3.2.1 Exploración histórica que se han concedido a Canarias.....	19
3.2.2 Concesión de permisos de exploración.....	22
4. METODOLOGÍA.....	27
4.1 Área de estudio.....	27
4.2 Etapa inicial: búsqueda de información y contextualización.....	28
4.3 Análisis de superficie y elaboración del mapa de potencial geotérmico.....	29
5. RESULTADOS.....	35
5.1 Análisis de superficie y mapa de potencial geotérmico.....	35
5.2 Relación entre las zonas más idóneas y la realidad del territorio.....	43
6. CONCLUSIONES.....	45
7. BIBLIOGRAFÍA.....	48

## **RESUMEN**

Las islas Canarias constituyen un archipiélago volcánico de intraplaca ubicadas sobre la corteza oceánica frente al margen continental pasivo del noroeste de África. El archipiélago se caracteriza por sucesivos episodios constructivos de actividad magmática de dominancia alcalina. En un contexto volcánico tan dinámico, la geotermia puede suponer una oportunidad para la transición hacia las energías renovables en las Islas.

Desde los años ochenta se han realizado exploraciones en Tenerife y Gran Canaria, las únicas que han desarrollado un complejo volcánico central. Estos estudios centrados en la búsqueda de fuentes renovables con el uso del calor magmático que se encuentra cerca de la superficie, quedaron paralizados debido a la falta de inversión en investigación y a la falta de tecnologías que permitan su descubrimiento. Hoy en día los avances de la tecnología y la creciente inversión en captar nuevas fuentes que no dependan de los combustibles fósiles han permitido continuar su exploración. En el presente trabajo, se han seleccionado dos parcelas anteriormente estudiadas, Garehagua 1 y 2, ubicadas en el sur de Tenerife. Se realizará el método “Play Fairway Analysis” para localizar las zonas de mayor interés a la hora de perforar y donde será más probable establecer una central geotérmica.

Palabras clave: Geotermia, Play Fairway Analysis, Islas Canarias, magma, alta entalpía, sondeo, energías renovables

## **ABSTRACT**

The Canary Islands constitute an intraplate volcanic archipelago located on the oceanic crust in front of the passive continental margin of northwest Africa. The archipelago is characterized by successive constructive episodes of alkaline-dominant magmatic activity. In such a dynamic volcanic context, geothermal energy can represent an opportunity for the transition towards renewable energies in the Islands.

Since the eighties, explorations have been carried out in Tenerife and Gran Canaria, the only ones that have developed a central volcanic complex. These studies focused on the search for renewable sources with the use of magmatic heat found near the surface, were paralyzed due to the lack of investment in research and the lack of technologies that allow their discovery. Today, advances in technology and growing investment in capturing new sources that do not depend on fossil fuels have allowed its exploration to continue. In this work, two previously studied plots have been selected, Garehagua 1 and 2, located in the south of Tenerife. The “Play Fairway Analysis” method will be carried out to locate the areas of greatest interest when drilling and where it will be most likely to establish a geothermal power plant.

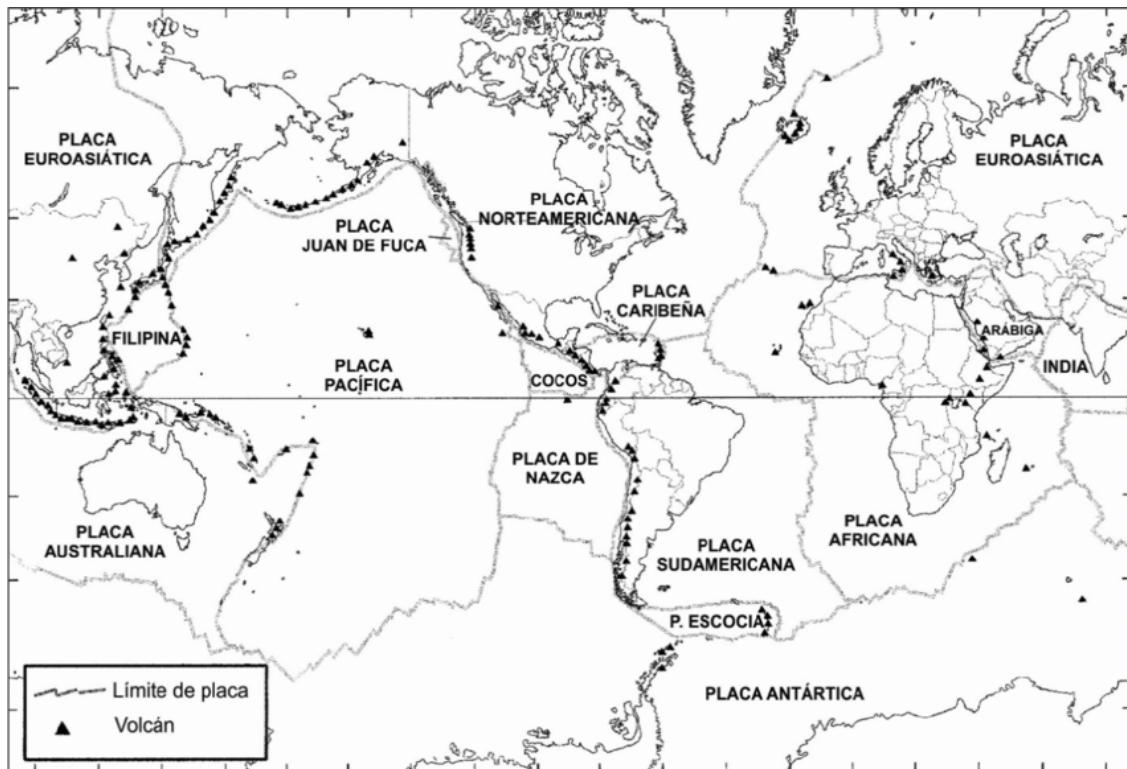
**Keywords:** Geothermal energy, Play Fairway Analysis, Canary Islands, magma, high enthalpy, survey, renewable energies

## 1. INTRODUCCIÓN

Se conoce como energía geotérmica al recurso calorífico que se encuentra almacenado en el interior de la Tierra y que sirve para generar energía eléctrica. Se produce cuando el calor existente bajo la superficie terrestre, generado a partir de los cuerpos de magma localizados a profundidades que varían entre los cientos de metros a los pocos kilómetros o de rocas calientes, es capaz de transferir su calor a una fuente de agua (Gupta y Roy, 2007). Actualmente, existe un creciente interés en torno a este tipo de energía, dado que se engloba dentro de las energías renovables y es considerada como relativamente limpia (Gupta y Roy, 2007). Como sugieren sus vocablos griegos geo (“Tierra”) y thermos (“calor”) la energía geotérmica aprovecha el calor interno de la tierra, para ser usado como energía calórica directa en balnearios, invernaderos ó en la industria alimenticia, ó bien para usos indirectos en los que es transformada en energía eléctrica (Geotermia, s.f).

La distribución de los lugares donde la energía geotérmica puede ser explotada no es azarosa y guarda una estrecha relación con las áreas volcánicas activas del planeta, las cuales a su vez tienen una relación directa con los bordes de las placas tectónicas y algunos sectores intraplaca (Limberger, et al., 2018) (ver mapa 1). Los reservorios hidrotermales se encuentran a lo largo de cordilleras y centros de dispersión en las fronteras entre las placas tectónicas de la litósfera. En esos lugares las divergencias de las placas producen grietas que permiten el transporte vertical de calor desde el manto hasta el piso oceánico. (Arriaga, 2012).

## Mapa 1: Organización de las placas tectónicas con el volcanismo



Fuente: tomado de Sigurdsson et al. 2000

Para que suceda un sistema geotérmico es necesario que exista una fuente de calor que se encuentre cerca de la superficie, rocas permeables, un obstáculo impermeable que acumule el calor, el propio fluido que transporta el calor y una zona permeable por el que el fluido pueda ascender hacia la superficie (Pilar-Martínez, 2015).

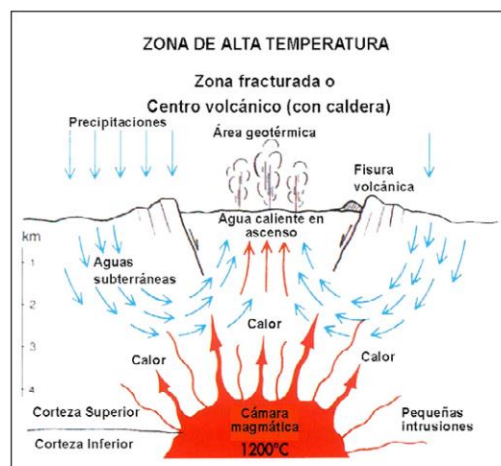


Figura 1: Esquema del funcionamiento de un campo geotérmico de alta entalpía en una caldera volcánica. Extraído de Lago et al. 2015

Como se muestra en la figura 1 el agua generada por las precipitaciones se infiltra en la corteza terrestre por fisuras, haciendo generar un acuífero subterráneo que al contacto con una cámara magmática hace caldear el agua, generando un yacimiento geotérmico que puede ser aprovechado a través de zonas permeables que se encuentren comunicadas hacia la superficie, haciéndose manifestar en forma de fumarolas, géiseres o aguas termales.

La explotación de este tipo de sistemas ha ido ganando interés en las últimas décadas debido a que el actual modelo de abastecimiento de energía eléctrica a escala global ha derivado en una política de constantes emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (IPCC 2021). Esto ha provocado que la gran mayoría de países en el mundo hayan empezado a buscar soluciones mediante la implementación de nuevas tecnologías energéticas que ayuden a minimizar los efectos ambientales que han causado las fuentes tradicionales de energía basadas en los combustibles fósiles. Por ello, la lucha contra el cambio climático es un compromiso asumido por multitud de países (Acuerdo de París de 2015). Europa, a través de varias directivas, propuso a finales de 2016 el paquete de medidas denominado “Energía Limpia para Todos los Europeos” sobre la gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima, en el que se establece la necesidad de elaboración de estrategias a largo plazo por parte de los Estados miembros, con una perspectiva de, al menos, 30 años. En España mediante el Plan Nacional Integrado De Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030 se han elaborado estrategias para la descarbonización de sus economías y el aumento del uso de energías renovables a medio y largo plazo.

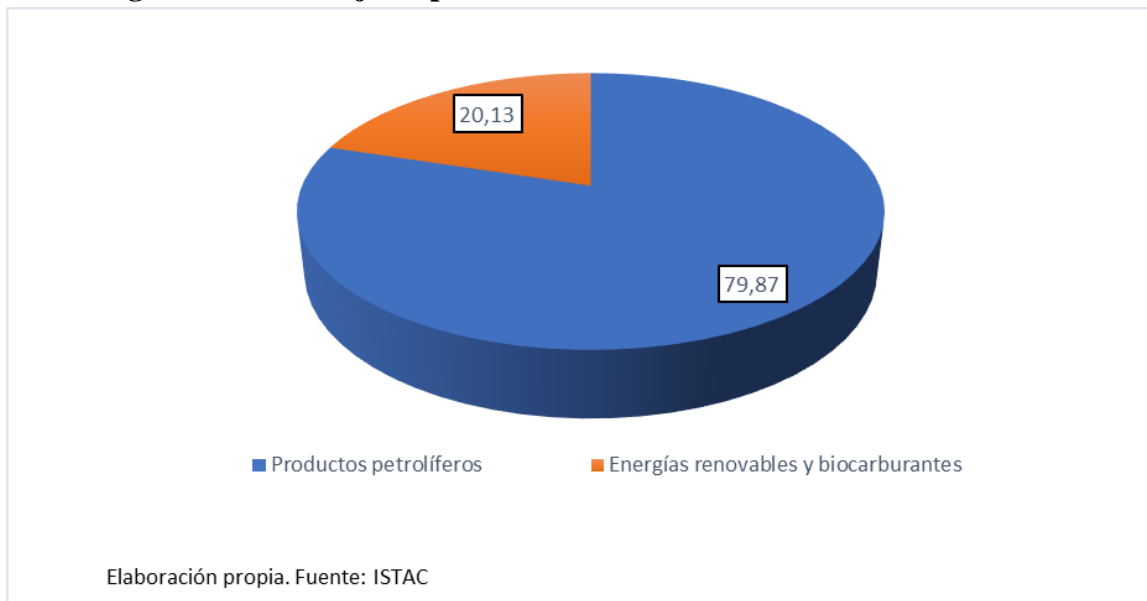
La energía geotérmica es una energía renovable, limpia, tanto para generar electricidad como para otros usos, llamados directos. En México su uso comercial es un éxito, teniendo una capacidad instalada de 953 MW<sub>e</sub>, y es bien conocido que abundan los recursos geotérmicos de moderada y baja temperatura. Como esta, se tienen otras fuentes de energía renovables y que no causan impacto ambiental, como la solar y la eólica, pero no se ha tomado conciencia plena de que debemos aprovecharlas al máximo para apoyar así un desarrollo sustentable (Mercado et al., 2007).

Canarias, que es un sistema aislado que depende casi en su totalidad de los combustibles fósiles como fuente de energía primaria, no es ajena a esta lucha por la



descarbonización de su economía. Desde finales de los años 80, el uso de energías renovables y la eficiencia energética en Canarias se ha impulsado a través de diversos planes energéticos, entre ellos la Estrategia Energética de Canarias 2015-2025 (EECAN25). Según la EECAN25 (2017), “*el actual sistema energético de Canarias se caracteriza por una casi total dependencia del exterior, basada en productos petrolíferos y con unos elevados costes de generación eléctrica, que tienen que ser reconocidos por el conjunto del sistema eléctrico para que los precios finales al consumidor sean similares a los del resto del territorio español. Esta situación se agrava aún más por la condición de Canarias de región ultraperiférica, aislada energéticamente de otros territorios.*”

**Figura 2: Porcentaje de producción de electricidad en Canarias 2022.**

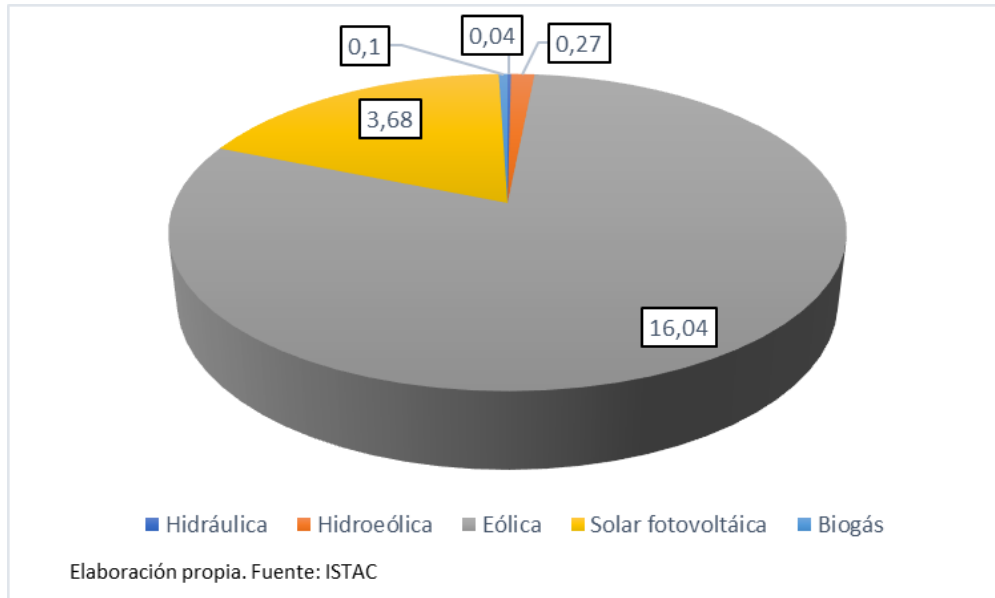


**Tabla 1: Fuentes de energía en Canarias 2022 (%)**

Fuentes de energía 2022	Porcentaje (%)
Productos petrolíferos	79,87
Energías renovables y biocarburantes	20,13

Elaboración propia Fuente:ISTAC

**Figura 3: Porcentaje de Producción de Energías renovables en Canarias 2022.**



**Tabla 2: Porcentaje de producción de energías renovables y biocarburantes en Canarias 2022**

Energías renovables y biocarburantes	Porcentaje (%)
Eólica	16,04
Solar fotovoltaica	3,68
Hidroeléctrica	0,27
Hidráulica	0,04
Biogás	0,1

Elaboración propia Fuente:ISTAC

Como se puede observar en la figura 2, la mayor fuente de energía usada para la producción eléctrica en el año 2022 fueron los productos petrolíferos (79,87%), seguido de las energías renovables (20,13%). Dentro de las energías renovables, la eólica fue la que inyectó una mayor cantidad de energía al mix energético (16,04%), mientras que la solar fotovoltaica supuso un 3,68% y el resto, como la hidroeléctrica, biogás e hidráulica, no alcanzaron el 1% (Figura 3).

Las Islas Canarias se encuentran localizadas en la Macaronesia y, como el conjunto de archipiélagos que la conforman, presentan importantes desafíos para la gestión de su sector eléctrico, como el hecho de que están compuestos por sistemas energéticos aislados y su alta dependencia del exterior, debido al gran protagonismo que tienen los combustibles fósiles en sus mix energéticos. Estos archipiélagos se caracterizan

por encontrarse en una zona de actividad volcánica, lo que abre la puerta a la posibilidad de que sea viable la producción energética a través de una tecnología basada en la geotermia, como ya sucede en Azores (Franco y Ponte, 2019).

Dentro del archipiélago canario, la isla de Tenerife presenta actualmente cualidades para introducir en su mix energético una tecnología basada en la energía calorífica mediante una planta geotérmica convencional. En distintas zonas de Tenerife se han realizado exploraciones de interés definidas en distintas áreas de interés geotérmico, mediante estudios de gravimetría 3D, vuelos infrarrojos (IRT), estudios de dipolos, estudios de sistemas de energía de depósito termal (SEDT), estudios magnetoteléuricos, mediciones de gases e isótopos en fumarolas, estudios geoquímicos en galerías y superficial, análisis de gases difusos, modelos geoelectricos del sistema geotérmico, medición de temperatura de superficie, mediciones aeromagnéticas, investigaciones audio-magnetoteléuricas e investigaciones realizadas con distintos modelos matemáticos y conceptuales, para acotar zonas de interés por su potencial geotérmico.

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo principal de este trabajo es evaluar en una parcela en el sur de Tenerife la probabilidad de que existan recursos geotérmicos de alta entalpía capaces de generar energía eléctrica. La hipótesis de partida es que esta zona de la isla presenta un potencial significativo para el desarrollo de este tipo de energía y dentro de ese sector existen zonas con mayores posibilidades de explotación, las cuales pueden ser evaluadas mediante un análisis detallado de superficie. Con ello se espera contribuir a la búsqueda de fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles en el archipiélago canario, de manera que ayuden a reducir los impactos producidos por el cambio climático. Además de ese objetivo principal se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- 1) Desarrollar un marco teórico que incluya el contexto y conceptos básicos sobre energía geotérmica que permita entender el funcionamiento de la misma y su posible implementación en Canarias.

- 2) Elaborar un mapa de potencial geotérmico en el sur de la isla de Tenerife utilizando la técnica de análisis superficial “Play Fairway Analysis”, que combina diferentes variables ambientales extraídas tanto de datos de campo como del uso de Sistemas de Información Geográfica.
- 3) Evaluar las relaciones espaciales existentes entre las áreas más idóneas para la explotación de la energía geotérmica y los elementos naturales y antrópicos actualmente presentes en el territorio.

### **3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 La energía geotérmica**

De acuerdo con la recopilación de datos de la Asociación de Energía Geotérmica (GEA), hay más de 200 GW de potencial hidrotérmico convencional disponible a nivel mundial y seguramente se registrarán aumentos sustanciales de la capacidad en los próximos cinco años y solo se ha aprovechado el 6% de esta disponibilidad, debido a que la capacidad instalada en los países aún se encuentra en desarrollo (Sánchez, León, & Vargas, 2020). La energía geotérmica es actualmente una de las renovables con mayor desarrollo en países como Estados Unidos, Italia, México o Islandia. Entre los países que lideran la capacidad operativa de energía geotérmica se resalta a los Estados Unidos con más de 3,5 gigavatios (GW), seguido de Filipinas (1,9 GW), Indonesia (casi 1,4 GW) y México (más de 1 GW) (Sánchez Alvarado et al., 2021). Todos ellos son territorios que albergan en mayor o menor medida regiones con actividad volcánica. Se puede tomar como ejemplo la isla de Balut, en Filipinas, que como el caso de estudio es un territorio insular volcánico. Esta isla constituye un volcán submarino emergente junto con otros centros volcánicos de la isla de Mindanao. Según estudios realizados en Balut, se estima el tamaño del posible recurso explotable a 4-9 km<sup>2</sup> con el supuesto de densidad de potencia de 5 megavatios/km<sup>2</sup>, lo que se traduce en un potencial energético de 20-45 MW (Fronza et al., 2015).

La generación de energía eléctrica a partir de fluidos almacenados en sistemas hidrotermales o convencionales ha alcanzado una mayor madurez tecnológica como energía renovable. Hoy en día 51 países en el mundo generan electricidad a partir de este

recurso natural y 71 países utilizan la geotermia tanto para la generación de electricidad como para usos directos. (Gómez Arias & González Fernández, 2017).

En España la geotermia, sin embargo, es una fuente renovable que todavía está por desarrollar. El Plan Nacional Integrado De Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030 marca la hoja de ruta para el impulso de tecnologías renovables como es la geotermia. El texto se integra dentro de los actuales Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, vitales para enfrentar la lucha contra el cambio climático y la descarbonización de la industria. Entre esos objetivos la geotermia podría vincularse con los siguientes:

- Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. Busca asegurar que todas las personas tengan acceso a energía sin comprometer el medio ambiente. Plantea la necesidad de garantizar acceso universal a electricidad asequible en el horizonte 2030, para ello reclama la inversión en fuentes de energía limpia, como la solar, eólica y termales. Ello requiere la necesidad de ampliar las infraestructuras y mejorar la tecnología para suministrar energía limpia en todos los países.
- Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. Conlleva dirigir la industria a adaptarse a las nuevas normas sobre emisiones, reduciendo su huella de carbono con nuevos sistemas de innovación. Además, promueve la innovación en las diferentes industrias, entre ellas la energética, para fomentar un crecimiento sostenido, eficiente y no contaminante.
- Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Implica mejorar la planificación urbana y asegurar servicios básicos adecuados, así como la protección del patrimonio cultural y natural. Según la ONU, la desigualdad y los niveles de consumo urbano de energía y de contaminación son algunos de los principales retos que afectan a las ciudades y que tienen como consecuencia directa la contaminación del aire.
- Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos promoviendo la resiliencia y la capacidad de adaptación a los desastres relacionados con el clima, y mejorando la educación y la conciencia sobre este tema. La crisis climática requiere de medidas que reduzcan drásticamente la emisión de gases de efecto invernadero.

- Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad. son fundamentales para asegurar un entorno ambiental saludable y estable, lo cual puede beneficiar indirectamente a sectores como la geotermia.

En este contexto, la búsqueda de áreas idóneas para la implantación de este tipo de energía es un paso previo imprescindible que puede suponer años de investigación. En aquellas localizaciones geográficas en las que, según el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se reúnen las condiciones necesarias para que se pueda aprovechar económicamente la energía geotérmica existente en el suelo, se habla de que existe un campo geotérmico. Una vez identificados y localizados estos campos, se debe reconocer el tipo de yacimiento existente, pues de ello dependerá el modo de explotación del recurso y el tipo de planta geotérmica más adecuada que puede instalarse en la zona.

### **3.1.1 Tipos de yacimientos:**

La entalpía se considera la cantidad de calor que un sistema termodinámico libera o absorbe del entorno que lo rodea cuando está a una presión constante. Por ello, según el “Manual de Geotermia” elaborado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE) y el IGME en el año 2008, los yacimientos varían en función de si se trata de yacimientos de alta o baja temperatura.

*“Los yacimientos de alta entalpía se localizan en zonas de flujo de calor anómalo, mientras que los de baja entalpía corresponden a zonas estables de la corteza, con flujos de calor y gradientes geotérmicos normales que aprovechan los fluidos calientes contenidos en acuíferos profundos, en general sin cobertura impermeable.”*

De esta manera, pueden clasificarse como:

1. Yacimientos de alta entalpía

Estos yacimientos se encuentran gracias a la existencia de una roca que almacena el fluido a alta temperatura en un foco de calor que permite que el fluido se encuentre en condiciones de presión y alta temperatura superiores a los 150°C, permitiendo su aprovechamiento para la producción de energía.

## 2. Yacimientos de media entalpía

Son yacimientos donde los fluidos se encuentran a temperaturas situadas entre los 100 y los 150°C, permitiendo su uso para la producción de electricidad con ciclos binarios.

## 3. Yacimientos de baja entalpía

Estos últimos presentan yacimientos de bajas temperatura siendo inferiores a los 100°C y su aplicación se basa en los usos directos de calor, pueden ser utilizados para instalaciones balnearias, en sistemas convencionales de calefacción de viviendas o la calefacción de invernaderos.

El flujo de calor procedente del interior de la Tierra atraviesa los depósitos permeables más superficiales donde se encuentran las aguas subterráneas, asegurando así una notable estabilidad térmica de estas aguas y permitiendo la extensión del concepto de reservorio de baja entalpía.

**Tabla 3: Clasificación de yacimientos geotérmicos según la temperatura del suelo**

Tipo	Tipo de Terreno	Temperatura	Uso principal
Alta entalpía		> 150°C	Electricidad
Media entalpía		150-100°C	Electricidad, ciclos binarios
Baja entalpía	Sedimentos profundos	< 100°C	Calor de distrito
	Zonas volcánicas		
	Agua termales	50-22°C	Balnearios
Muy baja entalpía	Aguas subterráneas	22-10°C	Climatización
	Subsuelo con o sin agua	25-5°C	

Fuente: Lago et al. 2015

Los yacimientos de alta entalpía se localizan en zonas anómalas de flujo de calor, mientras que los de baja entalpía se localizan en zonas estables de la corteza con flujos de calor normales que aprovechan el calor de los fluidos calientes almacenados de acuíferos en profundidad (IGME, 1985). Esta estabilidad térmica se mantiene en el agua subterránea y también está presente en los materiales del subsuelo. El transporte del calor hacia zonas más externas de la corteza da la posibilidad de que a menos de diez metros de profundidad la temperatura se mantenga prácticamente estable durante las 24 horas del día y durante todo el año.

Para poder extraer la energía del fluido almacenado en el yacimiento geotérmico, aquél debe ser conducido primero hacia la superficie a través de un pozo. Mientras el fluido va en ascenso por la tubería y accesorios del pozo, su presión decrece, el vapor se expande y parte del líquido se transforma en vapor. Una vez que el fluido llega a la superficie, debe ser procesado antes de utilizarlo como fluido de trabajo para las plantas generadoras de energía eléctrica (Méndez et al., 2011).

### **3.1.2 Tipos de plantas geotérmicas**

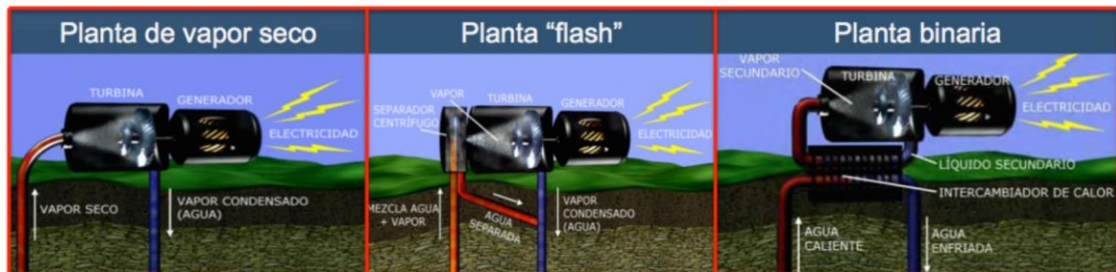
Dependiendo de las características del recurso geotérmico, la producción de energía se realiza mediante turbinas de vapor convencionales o de ciclo binario. Existen tres tipos de plantas para generar electricidad:

- Plantas de vapor seco: el agua líquida que llega a la superficie a través de las grietas del suelo se encuentra en forma de vapor de agua condensado o calentado (vapor seco); este vapor se dirige a las turbinas, que las impulsan para generar electricidad.
- Plantas Flash: el agua que llega a la superficie es una mezcla de vapor y líquido con una presión relativa a la fuente de agua y la temperatura del estado de saturación, por lo que el agua ha pasado por otro separador de aire/agua donde la porción de vapor ingresa a la turbina para la producción de energía, mientras que el agua líquida es expulsada.



- Plantas de ciclo binario: esta se adopta cuando la temperatura no es alta (entre los 120°-150°C) o el agua se encuentra con una alta salinidad. Principalmente se evita captar el fluido que se encuentra en el subsuelo utilizando un líquido secundario que tenga un comportamiento térmico mejor. El líquido termal transmite calor al secundario y este es calentado y vaporizado. El vapor activa la turbina y a continuación es enfriado y condensado.

**Figura 4: Tipos de plantas para generar electricidad.**



Fuente: Geotermia Online (Extraído de: <https://geotermiaonline.com/ventajas-de-la-geotermia/>)

En esta tabla se muestran los tipos de yacimientos con su respectiva planta de energía que se pueden utilizar, siendo el ciclo binario como se ha hablado anteriormente el que mejor generador de energía que puede producir.

**Tabla 4: tipos de yacimientos con su respectiva planta de energía**

Tipo de yacimiento	Tecnología	Temperatura
Alta entalpía	Uso directo Ciclo binario	> 150°C
Media entalpía	Ciclo binario	150-100°C
Baja entalpía	Uso directo Bomba de calor	< 100°C
Muy baja entalpía	Bomba de calor	22-5°C

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3 Problemas derivados de la explotación geotérmica.

Los yacimientos geotérmicos ofrecen ventajas ambientales significativas sobre otras fuentes de energía. Aunque se han planteado algunas dudas con relación al equilibrio con el medio ambiente. Existen estudios sobre la salmuera que reflejan que puede afectar a los fluidos geotérmicos y representar un peligro para el consumo humano y para el uso en la agricultura.

*“La alta concentración de sales, especialmente de NaCl, impide su uso para el riego. Los derrames de salmuera en suelos producen la precipitación de sales*

*una vez que la fase líquida se ha evaporado; esto causa incrustaciones e infertilidad de los suelos para uso agrícola o pecuario” (Birkle et al., s/f).*

Los fluidos extraídos del subsuelo pueden contener una mezcla de gases, en particular dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>S), metano (CH<sub>4</sub>) y amoníaco (NH<sub>3</sub>). Estos si se liberan contribuyen al calentamiento global, aunque las centrales geotérmicas experimentan altos niveles de ácidos y productos químicos suelen estar equipadas con sistemas de prevención de escapes de gases, y se podrían volver a inyectar estos gases de nuevo a la tierra como una forma de captura y almacenamiento de carbono. Además de los gases disueltos, el agua caliente de fuentes geotérmicas puede contener en solución trazas de sustancias químicas tóxicas como mercurio, arsénico, boro, antimonio y sal. Estos productos químicos salen de la solución a medida que el agua se enfría y pueden causar daños ambientales si se liberan (Pierce, 2011).

Es de valorar que han existido dos casos como la construcción de una planta en Wairakei en Nueva Zelanda que afectó negativamente a la estabilidad de la tierra, donde se han producido el hundimiento en el yacimiento. O en el proyecto en Basilea, Suiza, fue suspendido porque desencadenó terremotos como parte de la fracturación hidráulica donde se produjeron más de 10.000 eventos sísmicos de hasta 3,4 en la escala de Richter ocurrieron durante los primeros 6 días de inyección de agua (Pierce, 2011).

Dentro del aspecto más tecnológico, los problemas que se pueden encontrar a la hora de explotar un yacimiento aparecen relacionado con la química de las propias aguas geotérmicas, aunque hoy en día se encuentra dominado en el empleo de componentes de los equipos (Jarabo Friedrich et al., 1988). Uno de los principales problemas que se pueden encontrar en los equipos de extracción es la corrosión, debido a la presencia de ciertos elementos químicos y a las variaciones de presión la propia temperatura y el potencial hidrógeno (pH), esto se puede evitar teniendo un control constante de las condiciones de los instrumentos. Otra problemática se puede encontrar en los propios depósitos minerales, debido a la precipitación causada por la variación de presión, temperatura y pH. Los depósitos donde más frecuente se pueden encontrar son en zonas de calcita y sílice. Los equipos también deberán afrontar la problemática de las propias partículas sólidas, que son caracterizadas por la propia geología del yacimiento.

### **3.1.4 Beneficios de la Geotermia**

La principal ventaja que presenta la geotermia frente a otro tipo de energías es que puede redundar en una menor dependencia energética del exterior, reduce el consumo de combustibles fósiles y refuerza la seguridad de suministro al proporcionar un flujo constante de energía que no depende de variaciones estacionales. Su mayor beneficio es su carácter gestionable, dado que su recurso siempre está disponible para la generación eléctrica. Esto permite aportar seguridad de suministro dando estabilidad al sistema eléctrico, ya que posibilita calefacción, refrigeración y agua caliente con el mismo sistema de manera ininterrumpida las 24 horas al día, 365 días al año. Además, se puede caracterizar por unos costes de producción bajos, contando con un elevado factor de capacidad y producción. Presenta una clara oportunidad para el desarrollo de energías limpias en territorios volcánicos como el archipiélago canario dado su potencial, ya que la ubicación de las máquinas no está condicionada por chimeneas o expulsión de gases de combustión reduciendo las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Calvo et al., s. f.).

Las centrales geotérmicas existentes emiten una media de 122 kg de CO<sub>2</sub> por megavatio-hora (MW/h) de electricidad, una pequeña fracción de la intensidad de emisiones de las centrales convencionales de combustibles fósiles. Además utilizan 20 litros de agua dulce por MW/h frente a más de 1000 litros por MW/h para la energía nuclear, el carbón o el petróleo (Pierce, 2011).

### **3.2 La geotermia en Canarias**

Se han descubierto recursos mesófilos en diferentes regiones de la península, tanto a través de investigaciones geotérmicas como de información proveniente de la exploración de hidrocarburos. En cuanto a recursos de alta temperatura, si bien no se descarta su presencia en algunas zonas de la península, los esfuerzos investigadores se centraron y se centran en Canarias, fundamentalmente en la isla de Tenerife (IDAE e IGME, 2008).

A la espera de unos sondeos que verifiquen el recurso geotérmico de alta entalpía en Tenerife, La Palma y Gran Canaria, la realidad es que en Canarias el principal sector económico, el turismo, no es ajeno al uso de la geotermia de baja entalpía para su propio

beneficio. A través de sistemas de energía geotérmica de baja entalpía, Canarias cuenta con cuarenta y cinco instalaciones térmicas en establecimientos orientados al turismo, principalmente la mayoría de estos establecimientos se localizan en la isla de Lanzarote (Expósito, 2015) que son utilizados para instalaciones balnearias o en sistemas convencionales de calefacción de viviendas. Otro tipo de infraestructura turística que utiliza un sistema de energía geotérmica son los parques acuáticos. Este utiliza un sistema de bombas de calor de agua subterránea en el suroeste de la isla de Lanzarote. Esta instalación tiene una potencia instalada de calefacción de 450 kW (Santamarta et al., 2021).

Esto ha demostrado que el calor que emana del subsuelo de las islas ha podido ser aprovechado en el propio beneficio de las islas, principalmente en Lanzarote y Fuerteventura. Pero para ir más allá de sistemas de calefacción de baja entalpía y producir energía eléctrica todavía es necesario localizar los yacimientos.

### **3.2.1 Exploración histórica que se han concedido a Canarias**

En Canarias, hay constancia de estudios de exploración geotérmica desde los años 50. Los primeros trabajos científicos de reconocimiento geotérmico se llevaron a cabo a principios de los años 70 a través del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). El primer Plan Energético Nacional, desarrollado en el año 1974, introduce el concepto de las energías renovables en España y a partir de esta etapa el fondo público para el desarrollo de prospecciones geotérmicas se realiza a través del Instituto Geológico Minero de España y por la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras. Durante el periodo entre 1974 y 1993 se realizaron 12 estudios de exploración geotérmica en las Islas Canarias. Estos estudios se centran en islas que tienen un mayor potencial (Tenerife, La Palma, Lanzarote y Gran Canaria).

Entre 1992 y 1993, 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 (Piña-Varas et al., 2023).

En la siguiente tabla se presentan los estudios históricamente desarrollados en Canarias que han sido extraído de la Estrategia de la Geotermia en Canarias:

**Tabla 3: Exploraciones geotérmicas en Canarias**

<b>Años</b>	<b>Exploraciones geotérmicas en Canarias</b>
1974-1976	Inventario nacional de manifestaciones geotérmicas
1977	Evaluación del potencial geotérmico de la isla de Lanzarote y selección de anomalías en las islas Canarias
1978	Sondeo geotérmico Lanzarote-1
1979	Estudio de la energía geotérmica en Gran Canaria (Fase preliminar)
1981	Estudio geotérmico de las Montañas del Fuego por métodos magnetotelúricos y electromagnéticos
1983	Informe del trabajo de investigación del área de geotermia del Teneguía mediante termometría subterránea
1984	Estudio del gradiente geotérmico en áreas anómalas de Gran Canaria S1 y S2
1985	Prospecciones mediante geofísica y geoquímica de las posibilidades geotérmicas de las islas de Tenerife y La Palma
1987	Investigación geotérmica en las Islas Canarias y evaluación de Recursos y Reservas geotérmicas en España
1991-93	Investigaciones geotérmicas en el área central de la isla de Tenerife
1990-93	Shallow HDR geothermal field in Lanzarote (Canary Islands). Potential evaluation and heat extraction tests.
1990-93	Sondeo termométrico en la isla de Tenerife de 1.060 m de profundidad, en una zona anómala detectada mediante las primeras campañas de geofísica magnetotelúrica (MT) y geoquímica.

Elaboración propia

Estos estudios que se han mencionado en la tabla 3, han desarrollado diversas exploraciones. De acuerdo con el Catastro Minero del Ministerios de Transición Ecológica del Gobierno de España y por los datos del Gobierno de Canarias para el desarrollo de este trabajo, se presenta en la tabla 4 los derechos mineros en la isla de Tenerife otorgados antes de 2019, entre los que se encuentra la superficie donde se efectuará el análisis de superficie en geotermia en este trabajo: Garehagua I y II.

**Tabla 4: Derechos mineros otorgados en Tenerife para la investigación de geotermia**

Nombre	Empresa	Tipo	Superficie
Guayafanta	Petratherm	Exploración	540
Guayafanta	Petratherm	Investigación	540
Berolo	Petratherm	Exploración	360
Berolo	Petratherm	Investigación	360
Garehagua	Petratherm	Exploración	720
Garehagua	Petratherm	Investigación	720
Abeque	Petratherm	Investigación	-
TF01-GPI	Geothermeon	Exploración	-
TF02-GPI	Geothermeon	Exploración	-

Tabla 4: Derechos mineros otorgados en Tenerife para la investigación de geotermia. Elaboración propia.

En la figura 5 se muestra la ubicación de los diferentes permisos de investigación existentes en la isla de Tenerife: Geotermia I, Guayafanta 1, Garehagua 1, Ampliación a Garehagua y Berolo 1 y a los permisos de exploración Guayafanta, Garehagua, Berolo, TF01-GPI y TF02-GPI.

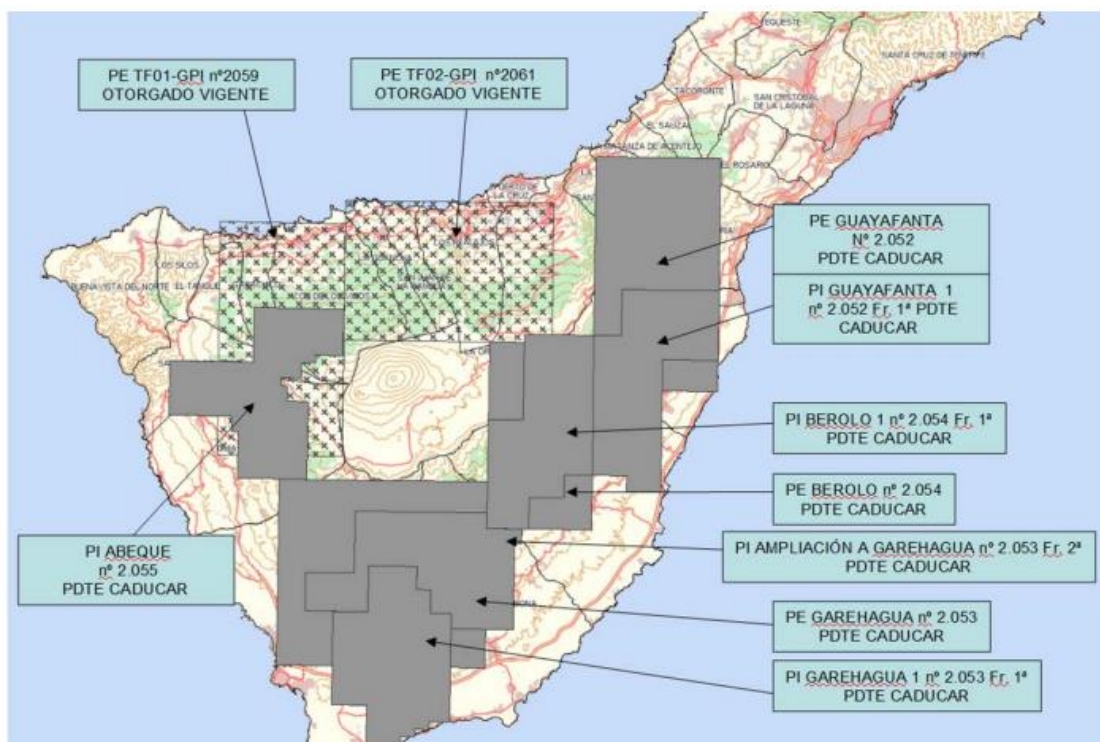


Figura 5: Zonas de reserva para investigaciones geotérmicas en Tenerife. Extraído de: Estrategia de Geotermia de Canarias.

Como se puede observar en el mapa sobre la zonas de reserva para la investigaciones geotérmicas en Tenerife, extraído de La Estrategia de Geotermia de Canarias, cuyos datos se remontan al año 2019, estas cuadrículas ya fueron objeto de concesiones, aunque todas han caducado. La mayoría de estas concesiones pertenecían a la empresa Petratherm, pero en 2018 también se le concedieron permisos de exploración a la empresa alemana Geothermeon.

La empresa Petratherm ha realizado investigaciones que han disminuido significativamente la incertidumbre sobre el potencial geotérmico de Tenerife y Gran Canaria. El informe afirma que se "localizaron las áreas con mayor potencial y probabilidad de éxito", aunque esto indica que se requieren más investigaciones para confirmar los hallazgos de los análisis.

De hecho, los principales estudios publicados que analizan los recursos geotérmicos en las islas suelen incluir en sus conclusiones que se requieren más estudios de investigación para la interpretación de datos tanto físicos como químicos para conocer con mayor detalle las propiedades particulares de los sistemas hidrotermales de Tenerife incluyendo, por ejemplo, el alcance de su variabilidad espacial. De esta forma se podría evaluar con mayor precisión la capacidad energética de la geotermia de la isla. (Montesdeoca-Martínez & Velázquez-Medina, 2023)

### **3.2.2 Concesión de permisos de exploración**

A lo largo de 2023 el Gobierno de Canarias ha impulsado de nuevo la búsqueda de estos recursos a través de la declaración de caducidad de las cuadrículas mineras en Tenerife, La Palma y Gran Canaria y la convocatoria del concurso para encontrar nuevos proyectos, amparado en la ley de minas.

El procedimiento por el que se otorgan los permisos de exploración se encuentra definido en la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas y la Ley 54/1980, de 5 de noviembre, de modificación de la Ley de Minas. Con esta ley el Estado puede aprovechar zonas donde existe un potencial geológico para el desarrollo económico y social de una nación. Según el artículo octavo de esta ley, existen tres tipos de áreas de reserva:

*“Las zonas de reserva podrán ser:*

*a) Especiales, para uno o varios recursos determinados en todo el territorio nacional, mar territorial y plataforma continental.*

*b) Provisionales, para la exploración e investigación, en zonas o áreas definidas, de todos o alguno de sus recursos.*

*c) Definitivas, para la explotación de los recursos evaluados en zonas o áreas concretas de una reserva provisional”*

Para la búsqueda de cualquier recurso minero la ley establece tres tipos de permisos: exploración, investigación y explotación. En la etapa de exploración geotérmica la solicitud es provisional, valorando si existe algún potencial para su aprovechamiento. Es en la fase de investigación, que obliga a la realización de un sondeo, la que certifica la presencia de los recursos mineros y la que permite elaborar un plan de viabilidad económica para la explotación de ese recurso. Si en la fase de investigación se demuestra que el yacimiento geotérmico es útil, se adquiere de manera automática la condición de definitivo en su explotación de los recursos evaluados.

El procedimiento de declaración de zonas de reservas y la realización de los trabajos necesarios se detallan en los artículos 9 y 11 de la Ley de Minas.

Artículo noveno.

*“La propuesta para la declaración de una zona de reserva podrá ser acordada por el Ministerio de Industria, de oficio o a petición de cualquier persona natural o jurídica, y deberá inscribirse en el Libro-Registro que a estos efectos llevará la Dirección General de Minas tramitándose el oportuno expediente en la forma y plazos que señale el Reglamento. Con esta inscripción el Estado adquirirá el derecho de prioridad sobre los terrenos francos que la propuesta comprenda, siempre que el expediente dé lugar a la declaración de zona reservada.*



## Artículo once

*“Uno. En las zonas reservadas podrán desarrollarse, en función del grado de conocimiento que sobre las mismas se tenga, operaciones de exploración, de investigación y de explotación.*

*Dos. La fase exploratoria se acordará por Orden del Ministerio de Industria con informe del de Hacienda, y se realizará directamente por el Estado o a través de sus organismos autónomos o mediante contrato con empresas nacionales o privadas.*

*Tres. Cuando el conocimiento de la zona permita o haga aconsejable efectuar labores de investigación, el Gobierno, oída la Organización Sindical, acordará si las mismas se realizan:*

*a) Directamente por el Estado o a través de sus organismos autónomos.*

*b) Mediante concurso público entre empresas españolas y extranjeras.*

*c) Por consorcio entre el Estado y las Entidades antes citadas.*

Las reservas de la zona se solicitan ante el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico. Las nuevas entradas deben de estar inscritas en el Libro-Registro gestionado por la Dirección General de Política Energética y Minas. Para la solicitud, se tramita como un expediente independiente a petición de cualquier persona. Una vez aceptado, el Estado obtiene los derechos de los terrenos y serán publicados a través del Boletín Oficial. Y para la resolución del expediente se adopta por Decreto a propuesta del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, con informes del Instituto Geológico Minero de España y el Consejo Superior del Ministerio de Industria y cualquier entidad gubernamental que se encuentre afectado.

Existen tres fases que pueden ser reservadas para el desarrollo de actuación de exploración, investigación y explotación:

- Fase de exploración: Esta exploración será acordada por Orden del Ministerio de Transición Ecológica, con informe del Ministerio de Economía y Hacienda, y lo llevará directamente por el Estado mediante organismos autónomos o contrato de empresas públicas o privadas.
- Fase de investigación: Tras los resultados de la fase de exploración se ejecutará las actividades de investigación. Existen tres posibilidades que el gobierno podrá decretar: Investigación directamente por el Estado, el desarrollo de un concurso público o por consorcio.
- Fase de explotación: Después de la investigación se concede el derecho a la explotación del recurso.

Fruto de la convocatoria del concurso de derechos mineros caducados por parte de la Dirección de Industria del Gobierno de Canarias, a través de la Orden n.º 1/2023, de 2 de enero, de la Consejería de Turismo, Industria y Comercio mediante la que se hace pública la declaración como terrenos francos de 3.089 cuadrículas mineras, la isla de Tenerife recibió las solicitudes de cuatro empresas para la búsqueda de recursos geotérmicos. (BOE-B-2023-959, 2023). Tras el desistimiento de dos de esas empresas finalmente serán el Instituto Tecnológico de Energías Renovables de Tenerife y la empresa Energía Geotérmica de Canarias quienes buscarán estos recursos. Ambas entidades, que firmaron un acuerdo público-privado para la investigación de este recurso, podrán investigar el recurso geotérmico en tres parcelas cada una de la isla. Estas parcelas afectan a los municipios de Fasnia, Arico, La Orotava, Icod de los Vinos, Garachico, El Tanque, Santiago del Teide, Guía de Isora, Vilaflor Adeje y Arona. (BOE-B-2024-23502, 2024)

Estas dos entidades también recibieron fondos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía para la investigación de geotermia de alta entalpía en Tenerife y La Palma, a través de la Resolución de la Presidenta de la E.P.E Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Este proceso requerirá de la realización de al menos un sondeo en cada una de las parcelas concedidas antes del antes del 31 de enero de 2026, según se establece en Disposición Duodécima de la primera convocatoria para la concesión de ayudas, o en el plazo máximo que se determinase, en caso de que tuviese

lugar una ampliación de plazos en la normativa reguladora del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. (ITER y DISA, 2024)

Las islas de La Palma y Gran Canaria también fueron fruto del mismo proceso de caducidad de los derechos mineros y de la convocatoria de un concurso para la presentación por parte de empresas y entidades públicas en un territorio total de 314 y 657 kilómetros cuadrados, respectivamente. En el momento de la redacción de este estudio no se ha informado definitivamente de qué proyectos han resultado los idóneos para la investigación geotérmica en estas islas debido a un retraso por un conflicto de competencias entre la Comunidad Autónoma y el Estado. Sin embargo, ya existen proyectos en La Palma y Gran Canaria que han sido beneficiarios de la convocatoria del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía para la investigación de geotermia de alta entalpía. Los cabildos de ambas islas también conformaron un consorcio público privado para la búsqueda de este recurso. (Martínez, 2024)

En la isla de Lanzarote la empresa RamRei Energy también presentó una solicitud de permiso de investigación geotérmica de alta entalpía en el municipio de Yaiza. Un permiso denominado Electrolanzarote que abarca 223 cuadrículas mineras que fue admitido por la Dirección de Industria del Gobierno de Canarias. Este permiso tiene una duración de tres años y plantea la posibilidad de hacer perforaciones. (Tomás García Ruiz, 2022) Es relevante que una empresa plantee la posibilidad de investigar la geotermia en Lanzarote ya que la propia Estrategia de la Geotermia en Canarias señala que:

*“Para el caso particular de Canarias, teniendo en cuenta que sólo se han llevado a cabo estudios en fase de exploración para las islas de Lanzarote, Gran Canaria, Tenerife y La Palma y, adicionalmente, siendo conscientes de que en Lanzarote ya se ha demostrado que el recurso existente es de tipo roca caliente superficial (anomalía no aprovechable mediante extracción de vapor), sólo se plantearían necesidades de ejecución de fase de investigación en Tenerife, La Palma y Gran Canaria”*

Todos los proyectos mencionados anteriormente corresponden a la fase de investigación, pero en los últimos años la Dirección General de Industria del Gobierno

de Canarias también ha admitido a trámite otros proyectos que se circunscriben a la fase previa, en la fase de exploración. La empresa Repsol presentó los permisos de exploración Isora y Tajao, de unas 630 cuadrículas mineras y 576 cuadrículas mineras, respectivamente. Este permiso afecta a los municipios de Santiago del Teide, Guía de Isora, Adeje, Granadilla de Abona y Arico. (Cruz, 2023)

La empresa palmera Geotermia La Palma también presentó el Permiso de Exploración denominado Norte, que abarca 1.260 cuadrículas mineras y afecta a los municipios de Barlovento, Breña Alta, Breña Baja, Garafía, Los Llanos de Aridane, El Paso, Puntagorda, Puntallana, San Andrés y Sauces, Santa Cruz de La Palma, Tazacorte y Tijarafe. El permiso tenía un año de duración y se centraba en la búsqueda de recursos de alta entalpía en la zona norte de la isla. (BOE-B-2022-40925, 2022)

En base a todo lo comentado anteriormente, se puede afirmar que Canarias cuenta actualmente con varios proyectos de exploración e investigación geotérmica que buscan la posibilidad de que existan recursos de este tipo en las islas y su posible explotación, especialmente en Lanzarote, Gran Canaria, Tenerife y La Palma. El presente estudio podría encuadrarse como una más de esas iniciativas, considerándose dentro de la fase de exploración o en los primeros años de una fase de investigación, como paso previo a la realización de un sondeo.

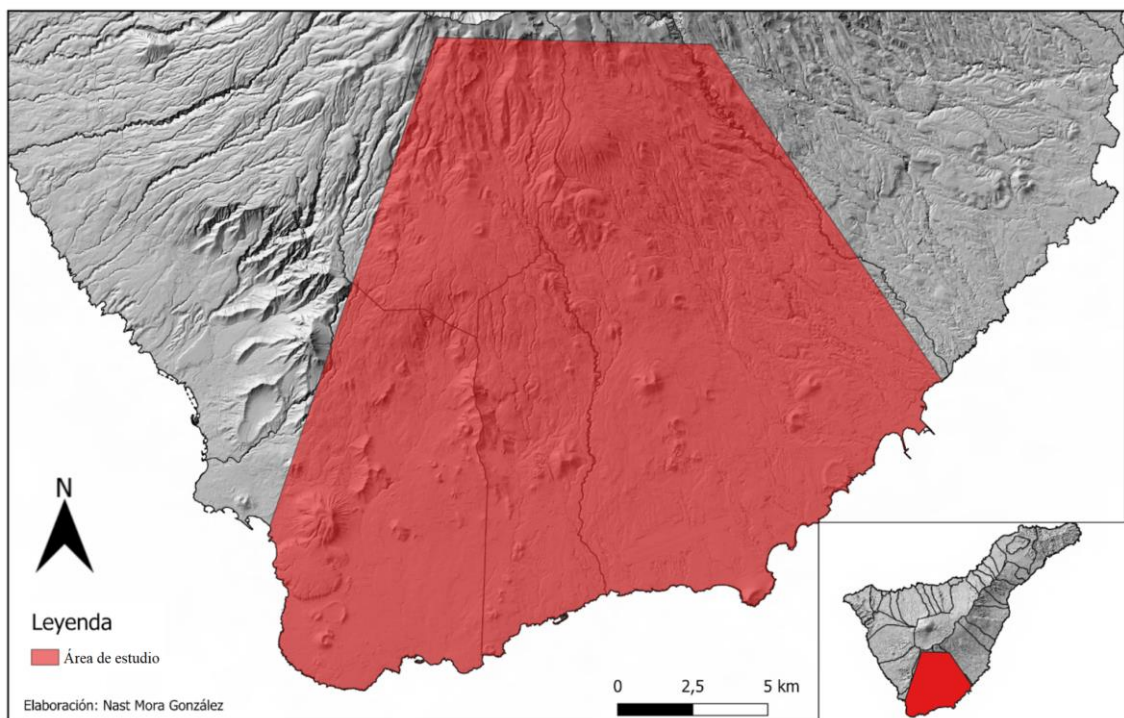
## **4. Metodología**

### **4.1 Área de estudio:**

La zona elegida para la elaboración del presente estudio se localiza en el extremo sur de la isla de Tenerife (Islas Canarias), entre los municipios de Vilaflor, Arona, San Miguel de Abona y Granadilla de Abona. La selección del área de estudio se debe principalmente a que se han realizado exploraciones en búsqueda de recursos geotérmicos, esencialmente en la zona de Garehagua (Mapa 1), con mayor información cuantitativa de recopilación de datos. Garehagua II, Garehagua (ambos ubicados en la NSRZ de Tenerife) y Abeque (ubicados en la NWRZ de Tenerife), en este orden, son las licencias mineras que muestran mayor potencial geotérmico. (Rodríguez et al., 2021)

En la zona abunda el volcanismo reciente que ha dado como resultado el Campo de Volcanes del Valle San Lorenzo-Las Galletas, con diversos estratovolcanes en los municipios de Arona, Granadilla y San Miguel (Dóniz, 2005). La distribución espacial de los conos volcánicos tienen direcciones NNE-SSO se ven acompañado por restos del Macizo Antiguo de Adeje que sigue la dirección norte-sur en la que destacan los restos de su Macizo como formación primigenia, y también de un conjunto de volcanes alineados y de roques dispersos por toda esta zona del sur de Tenerife (Relieve - TENERIFE - (GEVIC) Gran Enciclopedia Virtual Islas Canarias, s. f.)

**Mapa 1: Localización de la parcela Tenerife**



Mapa localización de la parcela de estudio para el análisis PFA. Elaboración propia

#### **4.2 Etapa inicial: búsqueda de información y contextualización**

Para alcanzar el objetivo principal de este trabajo se ha comenzado, tal y como se recoge en el objetivo específico 1, desarrollando un marco teórico y conceptual que permita contextualizar el funcionamiento de la energía geotérmica y conocer los antecedentes y posibilidades de su implantación en Canarias y Tenerife en particular. Para ello se ha procedido a una revisión bibliográfica de artículos científicos, divulgativos e informes técnicos a través de herramientas como Google Scholar así como la lectura de diferentes leyes y directrices tanto nacionales como internacionales relacionadas con el

campo de estudio, tal y como ha quedado reflejado en la sección anterior. Para ello ha sido necesario ahondar en la literatura ya publicada sobre las condiciones que se dan en el sur de la isla de Tenerife. Asimismo, esta búsqueda inicial de información científica y técnica ha servido para conocer más sobre las técnicas que permiten abordar el potencial geotérmico de una región, cuyos métodos escogidos para el caso del sur de Tenerife pasan a describirse a continuación.

### **4.3 Análisis de superficie y elaboración del mapa de potencial geotérmico**

Para alcanzar el objetivo específico 2, centrado en la elaboración de un mapa de potencialidad geotérmica, se ha llevado a cabo el análisis superficial de una parcela del sur de Tenerife, procediendo a analizar los datos recogidos por el Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN) en la zona de Garehagua, que han sido facilitados por el propio instituto para la elaboración de este estudio de forma altruista.

Los datos que se han usado para la elaboración de este estudio corresponden a datos sismológicos recogidos por INVOLCAN a través de la red de sismógrafos que la institución tiene en la isla. También se han analizado los datos de las campañas de geoquímica que el Instituto Tecnológico de Energías Renovables de Tenerife ha recogido al respecto de la presencia de los gases de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y Helio (H) y que han sido obtenidos mediante campañas de captación de gases que emergen a la superficie.

En el aspecto geológico se ha recurrido a los datos del Sistema de Información Territorial de Canaria (SITCAN) y a GRAFCAN para hacer un análisis de las estructuras geológicas presentes en la zona de estudio, principalmente de las alineaciones de volcanes mediante modelos digitales de terreno (MDT).

Además, se han creado capas de superposición de resistividades que describen el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, un valor alto es un indicativo que es un material aislante, mientras que un valor bajo indica que es un material conductor. Por ello, se analizan sobre diferentes niveles de profundidad: 0 m, -132m, -546 m y -1400 m. Estas capas juegan un papel crucial para entender las características del subsuelo que varía según la composición y la estructura geológica. Estos han sido

compartidos por INVOLCAN de otros estudios sobre resistividad en la zona sur de Tenerife. Estas capas se han unido representando dos capas a niveles de superficie donde en la capa roja se localiza la alta resistividad, mientras que la capa azul es una baja resistividad representadas en 1 (alto) y 0 (baja). La elaboración de los datos se obtiene mediante Self-Potential (SP) que se basa en analizar las diferencias de potencial eléctrico que ocurren naturalmente en la tierra. Las mediciones repetidas o continuas del Self-Potential (SP) podrían resultar una herramienta útil en el monitoreo de yacimientos geotérmicos (Yasukawa et al., 2005). Este método aplica para técnicas de exploración minera, exploración geotérmica e hidrogeología. Estas anomalías en el campo geoelectrico se pueden ver acrecentadas cuando hay zonas de alto gradiente térmico, como ocurre en campos geotérmicos.

La realización de la SP consiste en realizar medidas de la diferencia de potencial del campo eléctrico a lo largo de un perfil. El equipo básico requerido es bastante sencillo y consta de:

- Electrodo
- Cable eléctrico
- Carrete para recoger el cable
- Milivoltímetro con el que medir la diferencia de potencial



Figura 2: De izquierda a derecha se muestran: equipo básico Electrodo, barra de metal con cable y Milivoltímetro. Elaboración propia

Como se muestra en la figura 2 el electrodo es enterrado en la superficie como referencia, mientras que un electrodo se mantiene en un extremo del perfil (referencial)

y la barra de metal se entierra a lo largo de un perfil y el Milivoltímetro va recabando los datos.

Tras la primera etapa de realización de los mapas básicos (2, 3, 4, 5 y 6) se elaborará la unión de estos para la representación del Play Fairway Analysis (PFA) mediante el uso de un cálculo elaborado por INVOLCAN que se explicará en el siguiente párrafo (Lautze et al., 2017; Ito et al., 2017; Shervais et al. 2024). Esta técnica se usa en la industria petrolera como una metodología sistemática de eliminación de riesgos que integra datos geocientíficos cuantitativos para identificar posibles tendencias térmicas en varias escalas para una mayor exploración. La aplicación de PFA al proceso de exploración puede reducir los costos generales de exploración, mejorando así la financiación de la perforación. (Geothermal Data Repository, s. f.).

Se realiza un cálculo en los diferentes ráster que permite realizar cálculos sobre la base de valores de píxeles de un ráster existente mediante una ecuación que ha sido elaborada por INVOLCAN para este trabajo para tener la representación de los mapas:

$$X_n = \frac{4(X - \frac{X_1 + X_2}{2})}{X_2 - X_1}$$

La primera ecuación representa esta elaboración donde ( $X_n$ ) es el resultado, ( $X$ ) representa el parámetro de mapas básicos (2, 3, 4, 5 y 6) y  $X_1$  y  $X_2$  representan la probabilidad acumulada de los datos de las siguientes figuras que han sido elaborados por INVOLCAN:



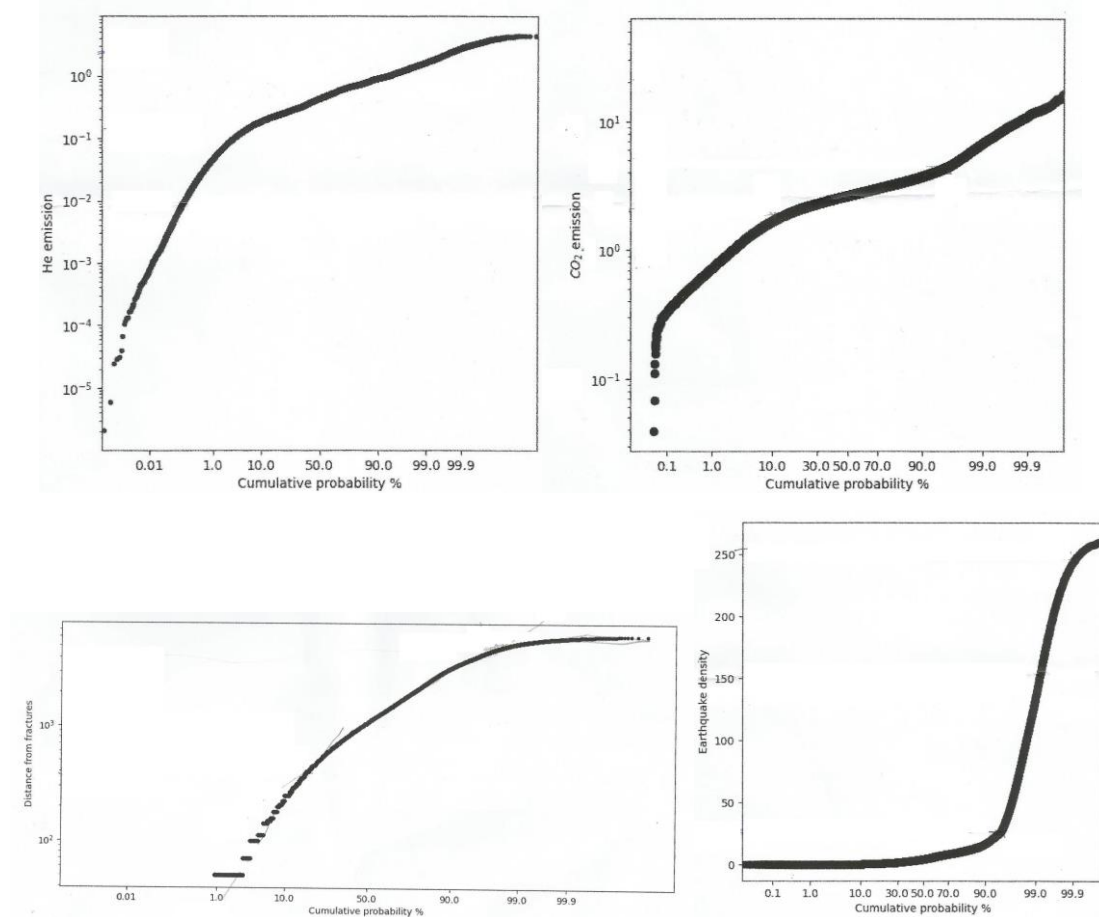


Figura 6 : Probabilidad acumulada del He, CO<sub>2</sub> , Fracturas y Terremotos. Elaboración propia.

La distribución de probabilidad acumulada es una función que se emplea para saber la probabilidad de una variable. Tal y como muestran los gráficos, se puede observar cómo se distribuye la probabilidad (eje vertical) a través de los datos (eje horizontal). A medida que se va avanzando en la muestra, también se avanza en la probabilidad.

Con la elaboración de los resultados, se elabora una segunda ecuación para evaluar el porcentaje en mínimo (0) y máximo (1) y no en porcentaje de cero a cien:

$$P= 1/(1+ \text{EXP}(-X_n))$$

En la segunda ecuación elaborada por INVOLCAN P muestra el resultado de la elaboración con el *raster calculator*. EXP indica 2,71828, se considera un número estimado elaborado por un experto en el área de Geofísica de INVOLCAN.

Para ello se efectuará un análisis de superficie en la búsqueda de una fuente geotérmica donde se podría construir una central geotérmica usando una técnica de probabilidad llamada “Play Fairway Analysis” (PFA). El uso de PFA para la investigación geotérmica puede abordar la cuantificación y reducción de la incertidumbre, mejorar las tasas de éxito de la perforación de exploración y abrir nuevas áreas al desarrollo. Esta metodología es especialmente útil para localizar y calificar sistemas hidrotermales ciegos sin expresión superficial, ya que la búsqueda de estos sistemas tradicionalmente requiere mucho tiempo y recursos. Dado que PFA es una técnica de mapeo de datos que identifica intersecciones favorables de calor, permeabilidad y fluido, no se requiere expresión superficial para la identificación de un recurso geotérmico.

Play Fairway Analysis implica identificar las características necesarias para que exista un recurso, identificar y clasificar los datos en un área geográfica, y luego combinar los conjuntos de datos para producir un mapa de probabilidad de regiones de recursos que tienen una mayor o menor probabilidad de fuentes. Luego, el mapa de probabilidad de recursos se utiliza para definir una evaluación que pueda identificar de manera más rentable los recursos viables. Para detectar una zona geotérmica viable se necesita la elaboración de tres mapas que son: El calor (H), la permeabilidad (P) y los fluidos (F) (Lautze et al., 2017).

Para la elaboración de estos tres mapas mencionados anteriormente, se necesitan cinco mapas: sismológico, geológico sobre la alineación de los volcanes, dos mapas geoquímicos en el que uno será sobre la composición del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el segundo mapa sobre la composición del Helio (He), y, por último, un mapa de resistividad.

Las emisiones de gases desde zonas profundas de la corteza hacia la superficie terrestre se desplazan a través de fracturas. La distribución de anomalías de desgasificación se ha usado como indicador geoquímico para la predicción de zonas que pueden ser para el interés geotermal. La recogida de estos datos se suelen obtener mediante la realización de cientos de mediciones en superficie mediante el método de la cámara de acumulación.

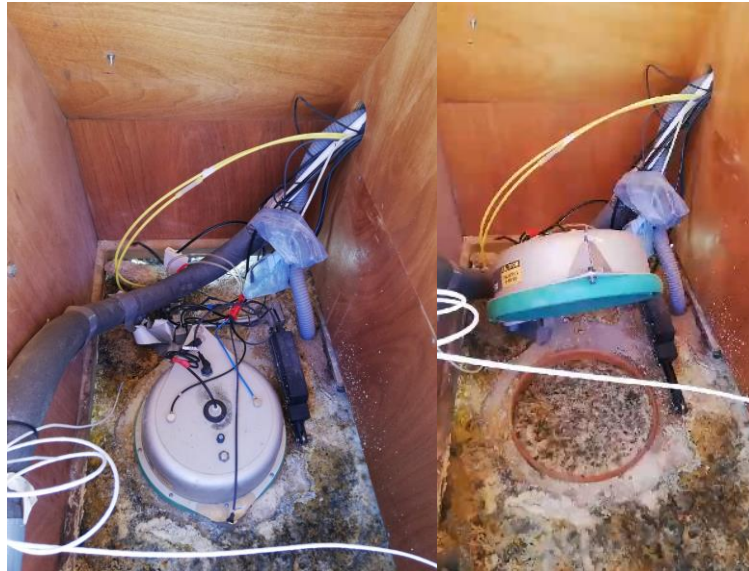


Figura 3: Cámara de acumulación de gases. Elaboración propia

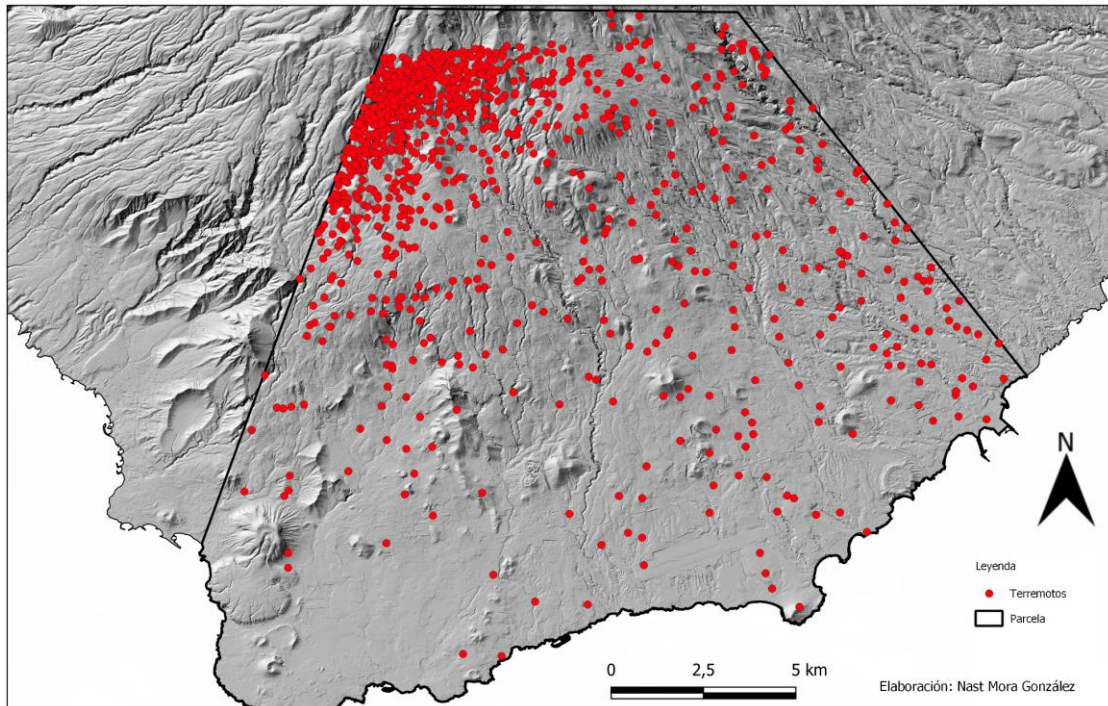
Estas cámaras, como se muestran en la figura 3, permiten calcular el flujo difuso de CO<sub>2</sub> y He. Para realizar mediciones difusas de flujo de CO<sub>2</sub> y He, la parte abierta de la cámara de acumulación se coloca por encima de la superficie del suelo. Una bomba permite que el aire circule en la cámara a través de un sensor de CO<sub>2</sub> LICOR y un sensor electroquímico. Estos mapas de gases son particularmente útiles para estudiar las condiciones físico-químicas de reservorios geotermales en profundidad y para detectar zonas de mayor permeabilidad relacionadas con la actividad hidrotermal de alta temperatura. Dentro de los métodos geoquímicos, los estudios de desgasificación difusa son una herramienta poderosa en la exploración geotérmica, ya que los enriquecimientos de concentración de gases pueden servir para definir las zonas de permeabilidad vertical que favorecen el ascenso de fluidos hidrotermales en profundidad. Los datos de gases han sido obtenidos por la entidad de INVOLCAN de otros estudios que han realizado en la misma zona de trabajo.

Por último, y en línea con lo expuesto con el objetivo específico 3, se ha realizado una evaluación espacial sobre los elementos tanto naturales como antrópicos que pudieran verse afectados en las zonas que el PFA ha señalado como más idóneas para la realización de sondeos y posible instalación de una planta geotérmica. Con todos los datos anteriormente señalados y mediante el software de Sistema de Información Geográfica (QGIS) versión 3.36 se han evaluado las relaciones espaciales existentes entre las áreas más idóneas para la explotación de la energía geotérmica y los elementos naturales y antrópicos actualmente presentes en el territorio.

## 5. Resultados

### 5.1 Análisis de superficie y mapa de potencial geotérmico

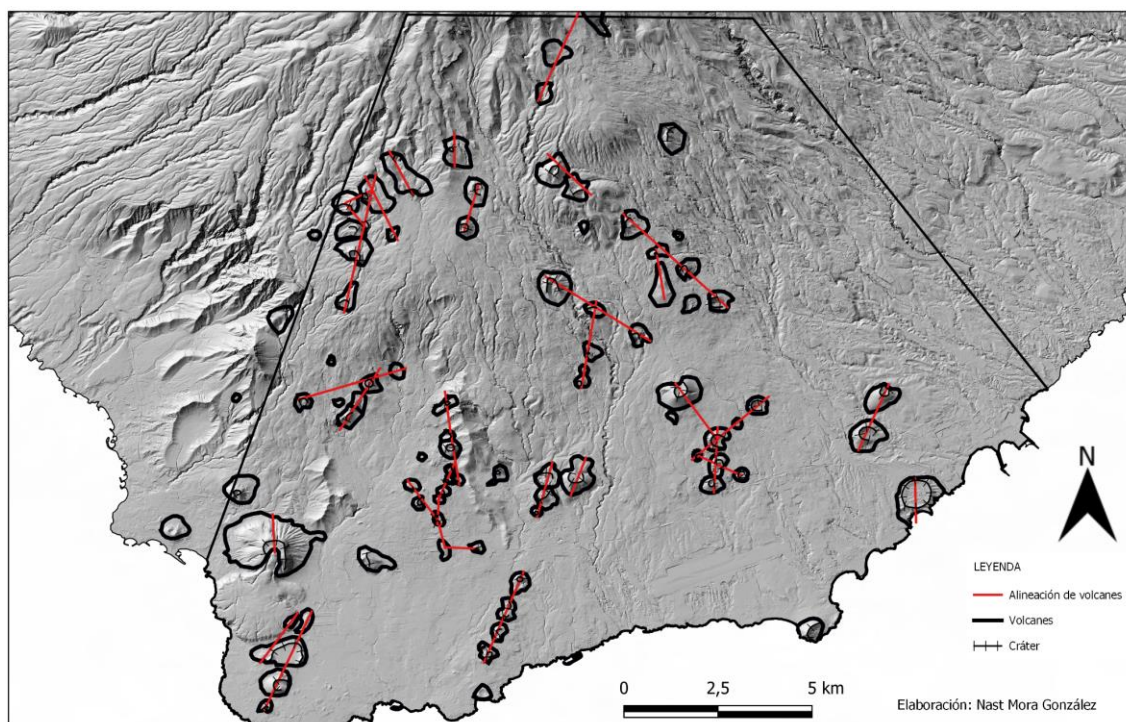
Mapa 2: Sismología



El mapa sismológico (mapa 2) indica las zonas de microsismicidad de magnitudes inferiores a 2 o 3 en la escala Richter mediante puntos rojos. Se observa una concentración en la zona noroeste de la parcela. El resto de los puntos se encuentran muy dispersos en toda la zona de estudio, siendo menores o muy pocas en las zonas costeras, indicando que los seísmos se localizan preferentemente en la zona N, áreas de montaña y cerca de volcanes. Esto puede indicar la presencia de fallas geológicas que podrían ser importantes para la circulación de fluidos geotérmicos o para evaluar la estabilidad de un área para la construcción de instalaciones geotérmicas. La microsismicidad en zonas donde hay un potencial geotérmico muestran que son herramientas extremadamente útiles para el mapeo de los recursos geotérmicos existentes y su posterior monitoreo de los yacimientos. (Maxwell, 2009).



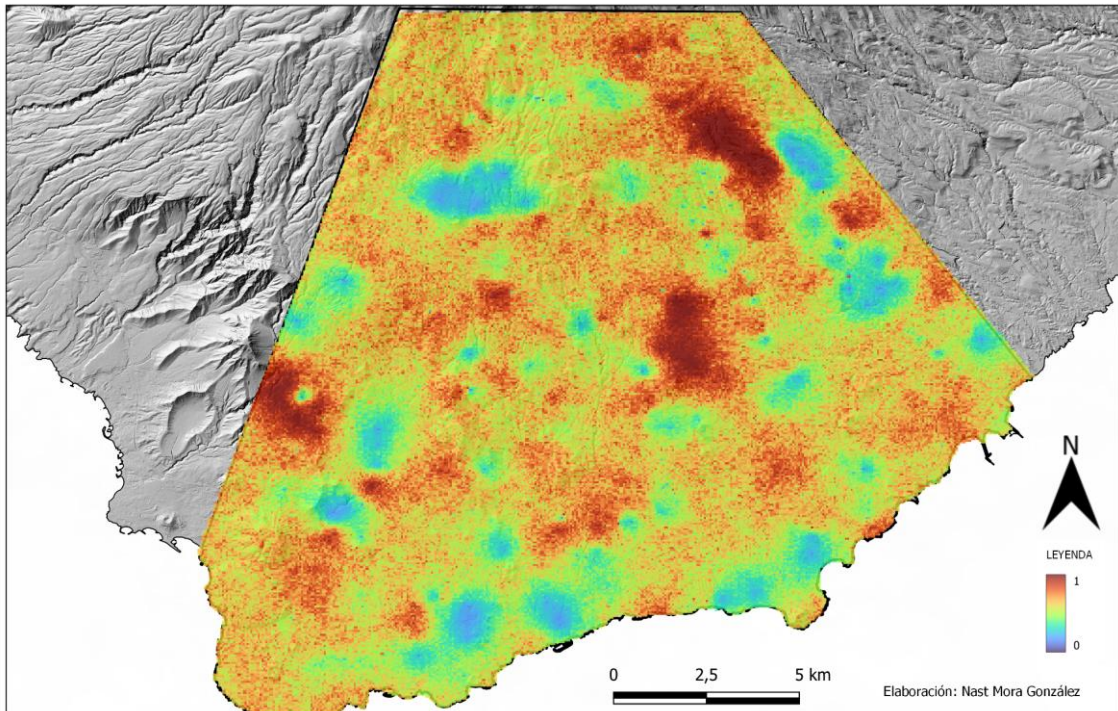
**Mapa 3: Geológico**



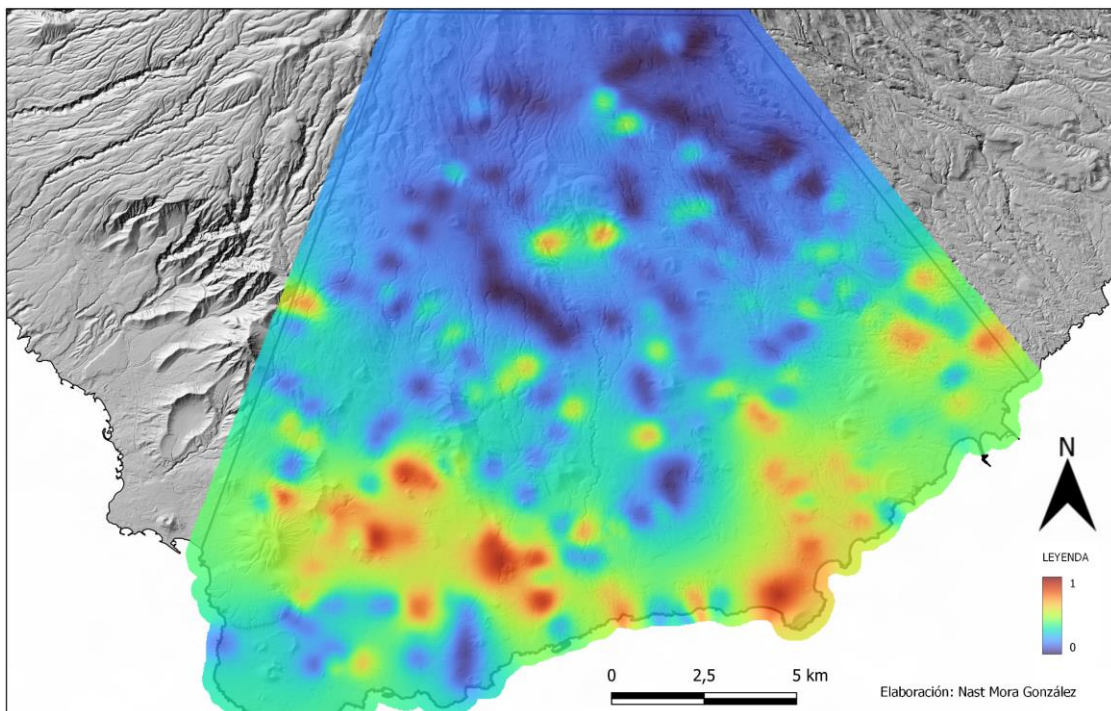
El mapa geológico (mapa 3) representa las alineaciones de los volcanes. Las fracturas y fallas pueden proporcionar rutas para que el magma ascienda. Estas estructuras pueden crear alineaciones de volcanes a lo largo de su extensión. En este caso, la zona representa un punto caliente en la corteza donde se crean plumas de magma que ascienden y forman estas alineaciones, indicando un recurso de calor en el subsuelo. Entre sus principales características, estos volcanes han tenido una actividad efusiva principalmente relacionadas con las erupciones de magmas basálticos y no suele darse siempre en el mismo punto por lo que no se formarán estratovolcanes. En cambio, presentan con el tiempo múltiples erupciones monogenéticas repartidas a lo largo de la dirección de esta dorsal de la Isla. (Germán Cervigón, 2020). Además, coincidiendo con la prolongación meridional del antiguo Edificio Cañadas. Las Bandas del Sur se configuran como el sector más extenso y el que cuenta con uno de los campos volcánicos más importante de la isla. El volcanismo basáltico reciente se concentra casi exclusivamente en el sur de Tenerife, lo cual se refleja en los sectores como el área de estudio, donde se observa una concentración de conos volcánicos que se encuentran principalmente sobre alineaciones NNE-SSO y NO-SE (Dóniz 2005). En aspecto de las coladas la zona presenta en su mayoría coladas basálticas, que constituyen la unidad principal del edificio. Formada por el apilamiento de coladas de más de 1.000 m de espesor. La máxima expresión topográfica es el Roque del Conde que alcanza los 1.080

m, formado por coladas subhorizontales de potencias variables entre 50 cm y los 4 m, de composiciones de basaltos pricríticos, ankaramíticos, plagioclásicos y traquibasaltos, con niveles de almagres intercalados entre ellas.

**Mapa 4: Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**



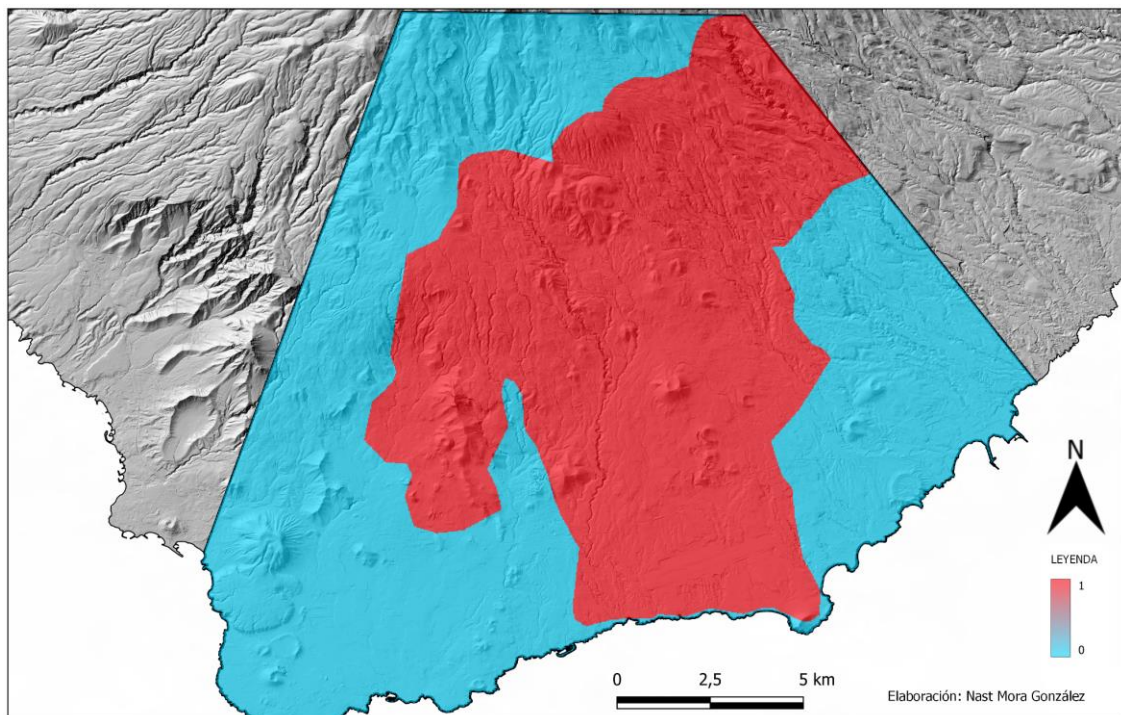
**Mapa 5: Helio (He)**





Los mapas geoquímicos 4 y 5 representan las emisiones del CO<sub>2</sub> y He. Como se puede observar, se han representado de manera que el máximo se establece en 1 (color rojo), mientras que las emisiones más bajas se encuentran a 0 (color azul). El CO<sub>2</sub> existe varias concentraciones, se pueden destacar tres zonas, estas se localizan en zonas de alineación de volcanes como puede ser en la zona W de la parcela de estudio y dos puntos más alejados en dirección NE. Además, existen varios puntos repartidos en la parcela donde no se emiten CO<sub>2</sub> marcadas en color azul, se puede destacar una concentración de puntos azules que recorren la costa y puntos dispersos fuera de las alineaciones volcánicas. En el mapa del He se descata una concentración de emisiones de color rojos en las zonas cercanas a la costa. A medida que se va adentrando en la isla en dirección N estas emisiones van desapareciendo localizando pequeños puntos en la zona central de la parcela. A medida que se acerca a las principales dorsales de la isla, van desapareciendo hasta llegar a las Cañadas del Teide.

**Mapa 6: Resistividad**

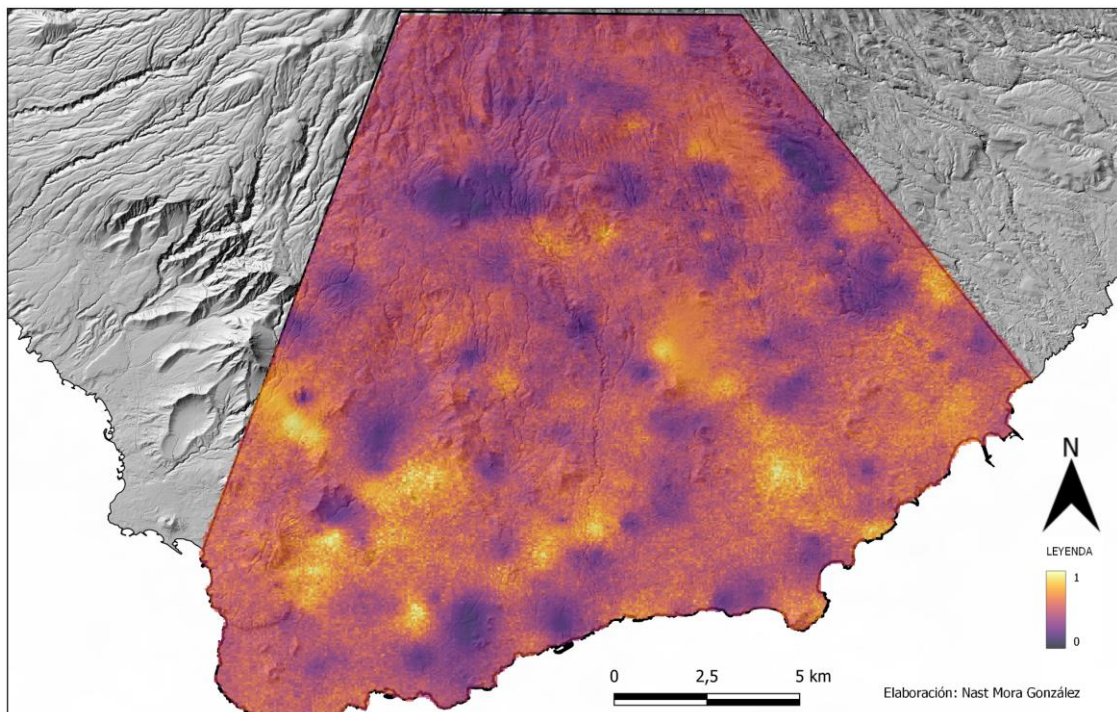


El mapa de resistividad (mapa 6) muestra la variabilidad de la resistencia eléctrica del subsuelo. Esta resistividad es crucial para determinar la temperatura del subsuelo, ya que existe una relación directa entre la resistividad y la temperatura en muchas regiones geológicas. Por lo que la zona roja representa la unión de los cuatro niveles (0 m, -132m,

-546 m y -1400 m) indicando que es la zona con mayor interés de resistividad en la zona, mientras que las zonas azules representan las localizaciones con menor resistividad, ya que estas no concentran los cuatro niveles en comparación con la zona roja.

Por consiguiente, se presentarán los tres mapas elaborados con este proceso para la elaboración final del PFA:

**Mapa 7: Heat (H)**

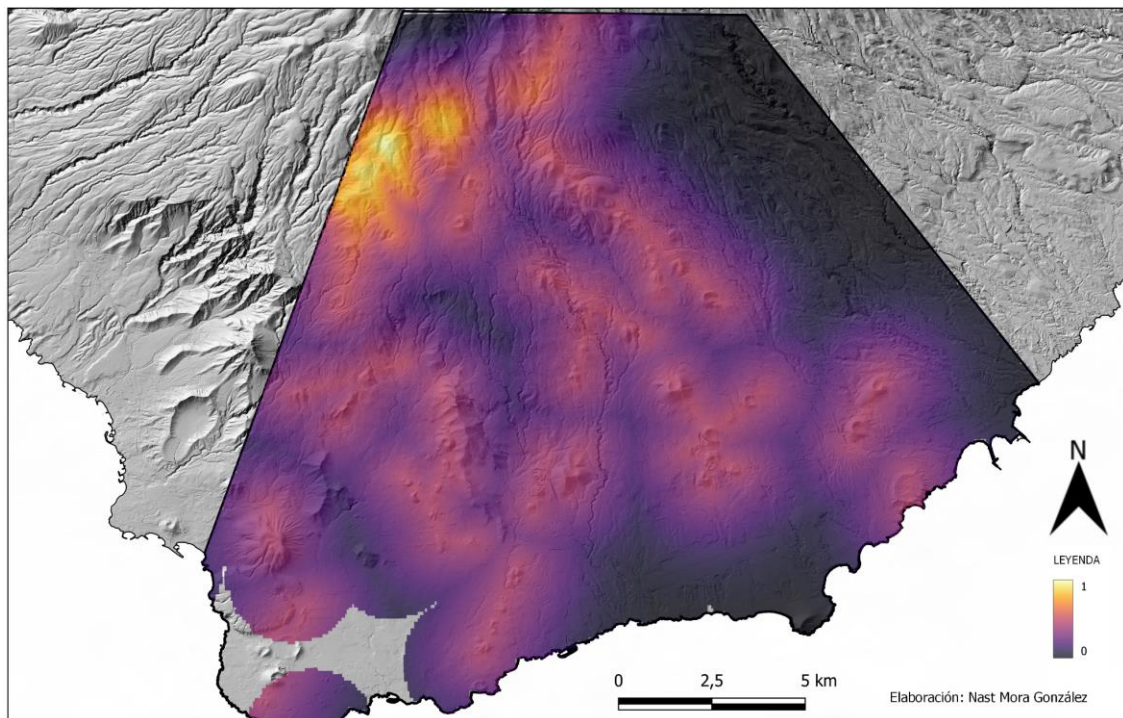


El mapa 7, de calor (H), se elabora mediante la unión de los mapas del Helio (Mapa 5) y CO<sub>2</sub> (Mapa 4). Como se observa se pueden localizar puntos de calor de color amarillo optimizando una rápida identificación de los mayores puntos de interés en la zona, estas en su mayoría se concentran en las zonas SW y SE principalmente en las alineaciones de los volcanes. A medida que se va al N, a las cañadas del Teide, van reduciéndose.

Esta estabilidad de la temperatura en el subsuelo, indicando las zonas donde se encuentra mayor conductividad del calor en la roca, es la clave que permite el aprovechamiento del recurso. Ya que las zonas con temperaturas más altas suelen ser más viables para la explotación geotérmica.

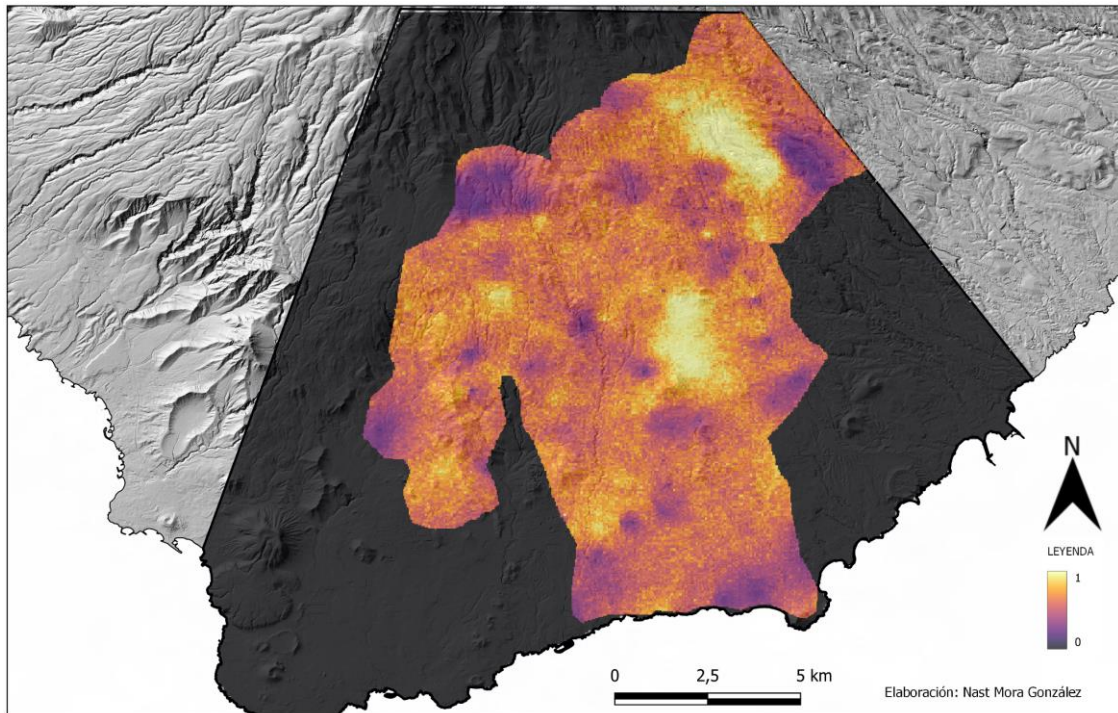


**Mapa 8: Permeabilidad (P)**



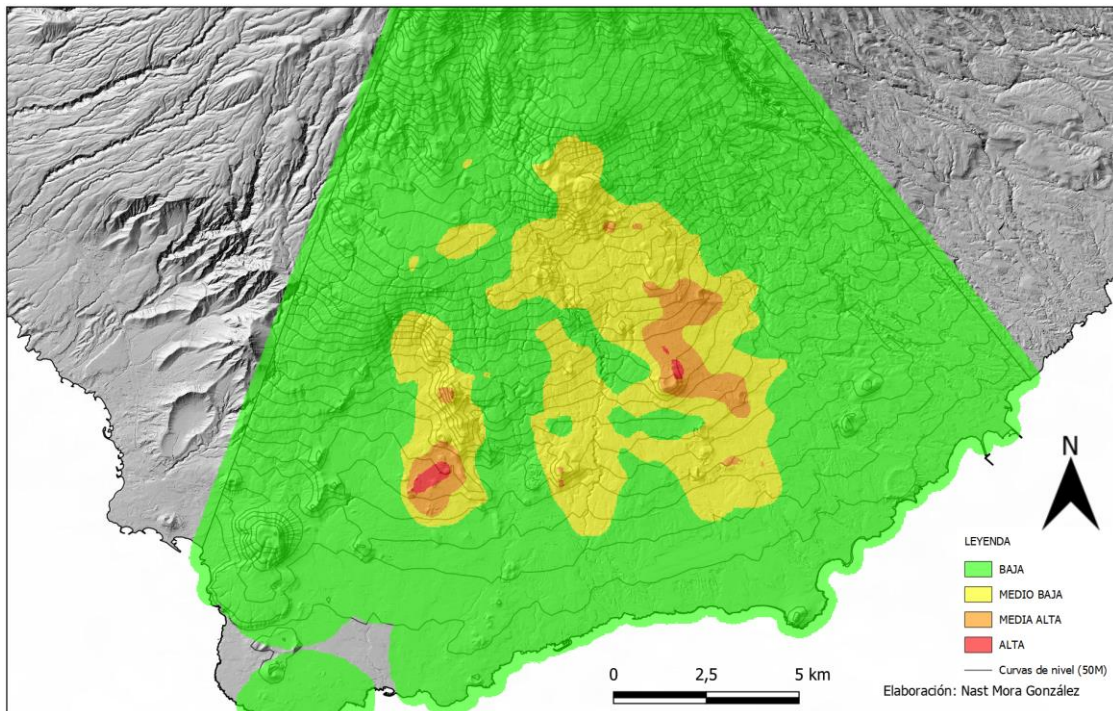
El mapa 8 es de permeabilidad. Las zonas donde mayor permeabilidad que se encuentra en el mapa es en la zona NW, cerca de las zonas con mayor sismicidad de la parcela, además siguen la alineación de los volcanes, encontrando zonas cero en algunos puntos de la costa y en la zona NE. Para su elaboración se necesita la unión del mapa de la sismología (mapa 2) y de la alineación de los volcanes (mapa 3) y se genera con el algoritmo de distancia euclidiana, que calcula desde el centro de la celda de origen hasta el centro de cada una de las celdas circundantes. Generando un raster donde se incluyen la distancia medida desde cada celda hasta el origen más cercano. Esta herramienta se puede utilizar para crear un mapa de adecuación, donde se necesitan datos que representan la distancia desde un objeto determinado, en este caso la alineación de los volcanes con el sísmológico.

**Mapa 9: Fluido (F)**



El mapa 9 de Fluido (F) se elabora mediante la unión de los mapas del Helio (Mapa 5), CO<sub>2</sub> (Mapa 4) y el mapa de Resistividad (Mapa 6). Como se puede observar muestra valores altos de fluido en colores más claros, mientras que las zonas con menos valores tienen colores más oscuros. Se pueden destacar dos puntos altos de concentración de fluidos en la zona central y en dirección NE. Estos fluidos transportan el calor desde el interior de la Tierra hasta la superficie. La disponibilidad y características de los fluidos (como salinidad y composición química) son cruciales para la eficiencia de la transferencia de calor y la operación de las plantas geotérmicas (Lachmar et al., 2023).

**Mapa 10: Mapa de potencial geotérmico basado en Play Fairway Analysis (PFA)**

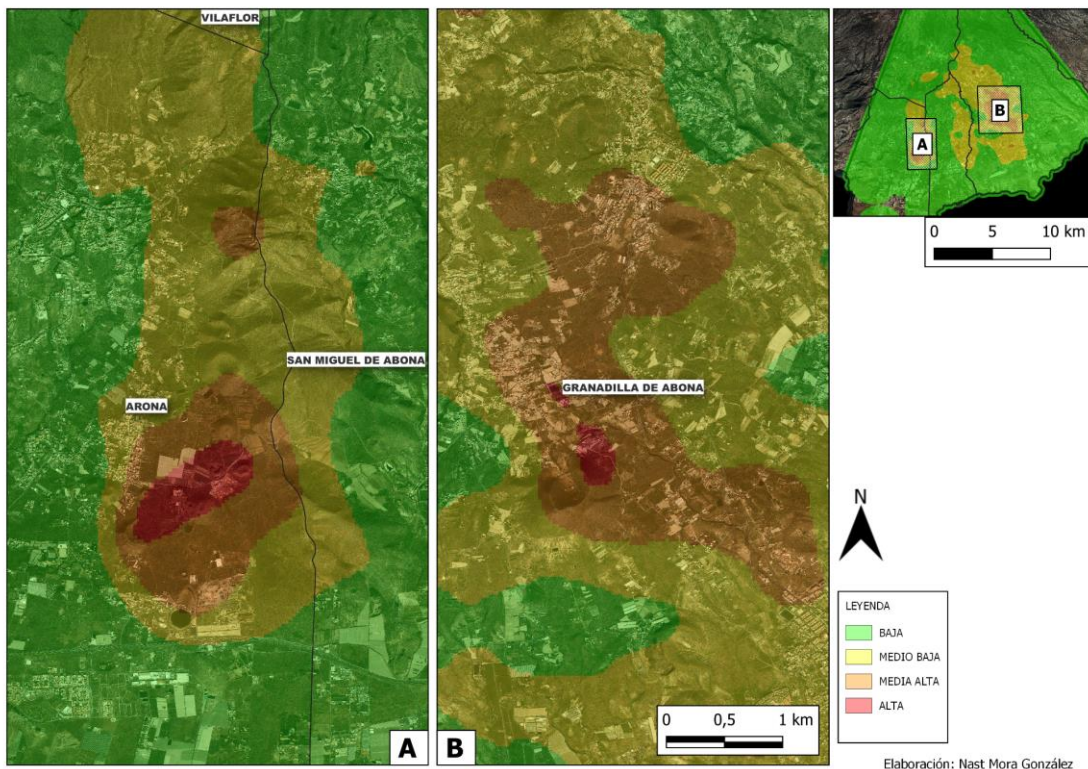


Para finalizar, la unión de los mapas: Heat, Permeabilidad y Fluido se elabora el resultado final del mapa de potencial geotérmico basado en el Play Fairway Analysis, un método de probabilidad relativa en la que resume una evidencia de un prospecto geotérmico exitoso en la zona. Como se muestra en el mapa 10 se han categorizado los resultados en cuatro niveles: Baja, media baja, media alta y alta probabilidad. Se puede destacar que se presentan las probabilidades de recursos resultantes en la que existen dos localidades adecuadas que cumplen los requisitos para poder reducir los costes en una perforación en las fases de exploración en colores rojos y naranja. Estas localidades se concentran en la zona central de la parcela justo sobre dos líneas de conos volcánicos.



## 5.2 Relación entre las zonas más idóneas y la realidad del territorio

**Mapa 11: Localizaciones más idóneas para la instalación de recursos geotérmicos en el sur de Tenerife**



El mapa 11 concentra las dos localizaciones (A y B) del total del territorio analizado donde existe una mayor probabilidad de que se encuentre un recurso geotérmico de alta entalpía. Las zonas coloreadas de color rojo y naranja muestran la mayor idoneidad, que coinciden con el entorno del municipio de Arona y Granadilla de Abona.

Sector A (Arona): En el aspecto urbanístico la zona de probabilidad alta se encuentra fuera de zonas residenciales, aunque en la zona de color naranja puede afectar algunas urbanizaciones al oeste. Dentro de la extensión roja se localizan instalaciones agrícolas abandonadas y pequeños cultivos agrícolas en uso, así como infraestructuras de almacenamiento del agua como estanques para el propio riego. También existe una parcela de uso industrial, en concreto un vertedero en la zona sur. Además, la mancha roja que muestra un mayor recurso está atravesada por la carretera general TF-657. Las áreas protegidas de la Red Natura 2000 se encuentran fuera de estos puntos de alto interés,

de manera que no afecta a los espacios protegidos más cercanos como son Montaña de Guaza y Roque de Jama que se localizan a una distancia de alrededor de 5 km.

Respecto a la vegetación, en un análisis preliminar se puede concluir que en la zona más idónea (color rojo) no existen especies protegidas o amenazadas. Solo en algunos sectores marcados con color amarillo o naranja podrían existir ejemplares dispersos de viborina triste (*Echium triste*) u oro de risco (*Anagyris latifolia*) según su distribución en el Banco de Datos de Biodiversidad de Canarias (2024). Sin embargo, lo que principalmente encontramos en la zona de acuerdo con el Mapa de Vegetación de Canarias (Del Arco et al., 2006) es vegetación en forma de plantaciones o matorral como el tabaibal-cardonal, en su mayoría degradado. En el aspecto geológico, se observa una alineación de un campo de volcanes estrombolianos de pequeño tamaño que incluye los conos monogénicos de Montaña Quemada, Montaña Cambada o Montaña de las Tabaibas entre otros. La mayoría se encuentran acorralados por urbanizaciones o zonas agrícolas y en alguno de ellos se ha extraído parcialmente picón, en la zona de interés. Prácticamente todos ellos se alinean según una fisura eruptiva de dirección N-S. Están compuestos por acumulaciones de escorias, bombas y lapillis de naturaleza basáltica que podrían verse parcialmente afectados por la instalación de una central geotérmica. Sus coladas, por el contrario, se encuentran ya ampliamente transformadas por los usos agrícolas y urbanos de la zona.

El sector B (Granadilla de Abona): La zona de probabilidad alta y media alta se encuentra en una localización muy desarrollada antrópicamente. En este sector se localizan las poblaciones de Granadilla, Los Llanos y Yaco, y se encuentra además ocupados por zonas agrícolas de autoconsumo. Dentro de este sector no se ubican áreas protegidas, siendo la más cercana Montaña de Ifara y Los Riscos que se encuentra a una distancia de 3 km. En lo que respecta a la vegetación no se observan en la zona especies protegidas, predominando matorrales de sustitución y degradación tales como tabaibales amargos, inciensales o vinagrerales así como herbazales nitrófilos. En el aspecto geológico se observan diversos conos volcánicos y extensos malpaíses de coladas basálticas que se encuentran en diferentes niveles de degradación y transformación, procedentes de multitud de centros estrombolianos dispersos. Una de las zonas que el PFA nos ha señalado en rojo en esta localidad toca parcialmente Montaña Gorda, un cono volcánico

característico del paisaje de Granadilla que debería preservarse pese a no ser parte de la Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos.

En conjunto, se puede afirmar que los impactos medioambientales para una central geotérmica son menores que los existentes en las centrales térmicas de combustibles fósiles y nucleares, incluso menores en comparación con otras fuentes de energías renovables. Además, las emisiones de gases son muy bajas en comparación de otras fuentes térmicas de energía

Para la instalación de una central geotérmica la ocupación puede variar considerablemente dependiendo del tipo de planta y la capacidad de generación de energía que se requiere. En general, estas instalaciones ocupan áreas que van desde unas pocas hectáreas hasta varias decenas de hectáreas. (IDAE e IGME, 2008), las plantas geotérmicas pueden aumentar su escala hasta el tamaño del servicio público (más de 50 MW) sin ocupar mucho terreno o espacio (Gehring y Loksha, 2012). En Tenerife una central no abarcaría los amplios espacios que podría ocupar una planta similar en el continente, aunque esto depende de la cantidad de energía que se pueda producir su tamaño podría aumentar, hay que destacar que un sistema de tuberías que conecte la central con la fuente pueda efectuar una mayor ocupación en el territorio.

Se puede presuponer que, dado que en Tenerife no es necesaria una gran producción de megavatios, la central no abarcaría los amplios espacios que podría ocupar una planta similar en el continente. Además, las dos zonas que el PFA ha señalado como más idóneas muestran en la actualidad una notable alteración antrópica por lo que posiblemente podría aprovecharse algún espacio degradado lo suficientemente alejado de los núcleos poblacionales o elementos naturales que se han mencionado.

## **6. Conclusiones**

En Canarias, con los estudios que hay sobre la mesa, todavía no se puede certificar que la generación eléctrica a través de la geotermia sea un proyecto viable y rentable, pero las pistas que da el territorio insular hacen pensar que la implantación de una central geotérmica es especialmente posible en la isla de Tenerife. Si bien existen estudios, la

falta de recursos e inversión frenó la investigación para conocer dónde es posible encontrar las fuentes que hacen viable la explotación geotérmica.

Este estudio intenta suplir el déficit de información que se tiene sobre las localizaciones más idóneas para la realización de un sondeo para conocer si existen recursos geotérmicos. El sur de Tenerife es el territorio con mayor potencial para la posible instalación de una central geotérmica. A través de la técnica PFA se ha podido acotar aún más los puntos más idóneos para la realización de un sondeo.

Para el desarrollo de un sondeo en la búsqueda de la alta entalpía hay que destacar que el sector A (Mapa 11) es el más cualificado donde podría desarrollarse una central geotérmica de ciclo binario, ya que afectaría en menor medida a las poblaciones y evitaría la expropiación de viviendas. No hay que olvidar que el sector B localizado en Granadilla, (Mapa 11) también se considera un punto de gran interés y por ello no hay que descartarlo, sólo que el mayor desarrollo urbanístico en esta zona puede causar problemas administrativos a la hora de expropiar y trasladar a sus habitantes e implicaría cambios más sustanciales en el planeamiento vigente en comparación con el sector A en Arona.

Una fuente de energía como la geotermia de alta entalpía puede suponer un paso más hacia la autosuficiencia energética y prestigio como ejemplo de una fuente de energía que permita reducir la huella de carbono en las regiones ultraperiféricas, en las que siempre ha sido un reto buscar fuentes que no dependan del exterior. Además, la técnica del Play Fairway Analysis es crucial para identificar y localizar las áreas con el mayor potencial geotérmico, minimizando los riesgos y optimizando los recursos. Este enfoque meticuloso y basado en la consideración de diversos factores garantiza que la exploración y el desarrollo de la energía geotérmica en la isla sean eficaces y rentables, reduciendo costes en la búsqueda de estas fuentes. Con el uso de esta técnica en una sola parcela del sur de Tenerife se corrobora una metodología que facilite localizar otros recursos en la propia isla y en otras como Gran Canaria, Lanzarote, El Hierro o La Palma, donde en 2021 se produce la erupción del Tajogaite. Un recurso que brindan las propias islas, en comparación a otras fuentes de energía externas que ocupen mayor espacio en el poco territorio que tienen las islas. Las plantas geotérmicas utilizan 3,5 kilómetros cuadrados por gigavatio de producción eléctrica frente a los 32 y 12 kilómetros cuadrados de las instalaciones de carbón y los parques eólicos (Introduction To Geothermal Power, 2011).

Desde una perspectiva ambiental, se emiten menos gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles, lo que ayuda a cumplir sus objetivos de reducción de emisiones y mejorar la calidad del aire local.

Hay que destacar que en este estudio no se han realizado otras mediciones relevantes como la gravedad residual anómala, dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), en relación de cloro y magnesio, el agua subterránea y su temperatura, distancias más cercanas de respiraderos volcánicos, recarga del nivel freático y la recarga de las aguas subterráneas. En futuros estudios, sería recomendable que también se apliquen estos datos en los análisis de superficie, ya que es información que podría enriquecer el conocimiento sobre el recurso.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Antiguos, L. E. (s/f). *DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS de TENERIFE*. Idecanarias.es.  
[https://www.idecanarias.es/resources/GEOLOGICO/TF\\_LITO\\_unidades\\_geologicas.pdf](https://www.idecanarias.es/resources/GEOLOGICO/TF_LITO_unidades_geologicas.pdf)
- Arriaga, M. C. S. (2012). *Termodinámica del fluido geotérmico en condiciones supercríticas*. Geotermia, 45.  
<https://www.geotermia.org.mx/app/assets/media/2017/11/Geotermia-Vol25-1.pdf#page=47>
- Banco de Datos de Biodiversidad de Canarias. Gobierno de Canarias. (<https://www.biodiversidadcanarias.es/biota>) [Junio de 2024].
- Birkle, P., Torres-Rodríguez, V., Partida, E. G.-, & Guevara-García, M. (s/f). *IMPACTO AMBIENTAL EN CAMPOS GEOTÉRMICOS*. Iaea.org.  
<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/29/032/29032344.pdf>
- BOE-A-1973-1018 Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. (s. f.).  
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1973-1018>
- BOE-B-2023-959 (s/f) *Anuncio de la Secretaría General Técnica de la Consejería de Turismo, Industria y Comercio por la que hace pública la declaración como terrenos francos de los derechos mineros caducados de la sección D) de la Ley de Minas (recursos geotérmicos) en la isla de Tenerife, y se convoca y se aprueban las bases del concurso público sobre los mismos*. Boe.es  
[https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-B-2023-959](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-B-2023-959)
- BOE-B-2022-40925 (s/f) *Anuncio de la Dirección General de Industria por el que se hace público el otorgamiento del Permiso de Exploración denominado "NORTE", con expediente n.o 2065, para recursos geotérmicos de la sección D) de la Ley de Minas, en la isla de La Palma*. Boe.es.  
[https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-B-2022-40925](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-B-2022-40925)
- BOE-B-2024-23502 (2024) *Anuncio de la Dirección General de Industria por el que se hace pública la Admisión definitiva a trámite de las solicitudes de otorgamiento de los Permisos de Investigación nombrados "EGC-TF01 Jaira", con n.º de registro 2070, "EGC-TF02 Tahatan", con n.º de registro 2071 y "EGC-TF03 Tikahit", con n.º de registro 2072, para recursos geotérmicos de la sección D) de*

la Ley de Minas, en la isla de Tenerife. <https://www.derecho.com/boe/anuncio-de-la-direccion-general-de-industria-por-el-que-se-hace-publica-la-admision-definitiva-a-tramite-de-las-solicitudes-de-otorgamiento-de-los-permisos-de-investigacion-nombrados-egctf01-jaira-con-n-de-registro-2070-egctf02-tahatan-con-n-de-registro-2071-y-egctf03-tikahit-con-n-de-registro-2072-para-recursos-geotermicos-de-la-seccion-d-de-la-ley-de-minas-en-la-isla-de-tenerife-752357>

Calvo, R., Arispe, S., García, J., Siroit, G., Ramírez, M., Gaviano, A., Larreamendy, P., Bornholdt, L., & Goldenberg, F. (s. f.). *¿Cómo entender la energía bajo tus pies? Beneficios y gestión socioambiental efectiva de proyectos geotérmicos en América Latina y el Caribe*. PolicyCommons. <https://policycommons.net/artifacts/2677136/como-entender-la-energia-bajo-tus-pies-beneficios-y-gestion-socioambiental-efectiva-de-proyectos-geotermicos-en-america-latina-y-el-caribe/3700321/>

Cruz, A. (2023,). *Repsol se interesa en explorar la geotermia de Tenerife*. AtlánticoHoy. [https://www.atlanticohoy.com/economia/repsol-se-interesa-en-explorar-geotermia-tenerife\\_1514654\\_102.html](https://www.atlanticohoy.com/economia/repsol-se-interesa-en-explorar-geotermia-tenerife_1514654_102.html)

Dirección general de industrias y mineras . *Alta, media y baja entalpía generación de electricidad y aprovechamiento directo del calor*. (s.f) [https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/images/Documentos/Estudios/GEOTERMIA-ALTA-D2\\_V1.pdf](https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/images/Documentos/Estudios/GEOTERMIA-ALTA-D2_V1.pdf)

Dirección General de Industria (2024). *Anuncio de la Dirección General de Industria por el que se hace pública la Admisión definitiva a trámite de las solicitudes de otorgamiento de los Permisos de Investigación nombrados*. Boletín Oficial del Estado. <https://www.derecho.com/boe/anuncio-de-la-direccion-general-de-industria-por-el-que-se-hace-publica-la-admision-definitiva-a-tramite-de-las-solicitudes-de-otorgamiento-de-los-permisos-de-investigacion-nombrados-egctf01-jaira-con-n-de-registro-2070-egctf02-tahatan-con-n-de-registro-2071-y->

[egctf03-tikahit-con-n-de-registro-2072-para-recursos-geotermicos-de-la-seccion-d-de-la-ley-de-minas-en-la-isla-de-tenerife-752357](https://doi.org/10.3989/egeogr.2005.i259.141)

de Geotermia, E. *Geotermia Oil & Gas*. (s.f)

[https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Lopez-5/publication/349822746\\_GEOTERMIA\\_OILGAS/links/60424bdb299bf1e078572da8/GEOTERMIA-OIL-GAS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Lopez-5/publication/349822746_GEOTERMIA_OILGAS/links/60424bdb299bf1e078572da8/GEOTERMIA-OIL-GAS.pdf)

de París, A. (2015). *Acuerdo de París. Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático (CMNUCC)*.

[https://residuoselectronicosal.org/wp-content/uploads/2019/12/Acuerdo\\_de\\_Par%C3%ADs.pdf](https://residuoselectronicosal.org/wp-content/uploads/2019/12/Acuerdo_de_Par%C3%ADs.pdf)

Del Arco, M. J., Wildpret, W., Pérez-de-Paz, P. L., Rodríguez, O., Acebes, J. R., García, A., ... & García, S. (2006). Mapa de Vegetación de Canarias. *GRAFCAN, Santa Cruz de Tenerife*. Consultado en el Visor de GRAFCAN en junio de 2024.

<https://visor.grafcan.es/>

Del Pilar Martínez, A. (2015). *Caracterización petrográfica y geoquímica de una sección del subsuelo en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla: el caso del pozo H-42*.

[https://www.researchgate.net/publication/341113925\\_Caracterizacion\\_petrografica\\_y\\_geoquimica\\_de\\_una\\_seccion\\_del\\_subsuelo\\_en\\_el\\_campo\\_geotermico\\_de\\_Los\\_Humeros\\_Puebla\\_el\\_caso\\_del\\_pozo\\_H-42](https://www.researchgate.net/publication/341113925_Caracterizacion_petrografica_y_geoquimica_de_una_seccion_del_subsuelo_en_el_campo_geotermico_de_Los_Humeros_Puebla_el_caso_del_pozo_H-42)

Dóniz Páez, F. J. (2005). *Los campos volcánicos basálticos monogénicos de la Isla de Tenerife (Canarias, España)*. *Estudios Geográficos*, 66(259), 461–480.

<https://doi.org/10.3989/egeogr.2005.i259.141>

- Expósito, M. D. C. (2015). *Análisis de la energía geotérmica de baja temperatura en terrenos volcánicos. Aplicaciones a la construcción en Tenerife.*  
<https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/53668>
- Franco, A., & Ponte, C. (2019). *The role of geothermal in the energy transition in the Azores, Portugal. European Geologist. Geology and Energy Transition*, 47, 21-27.
- Fronza, A. D., Marasigan, M. C., & Lazaro, V. S. (2015). *Geothermal development in the Philippines: The country update. In Proceedings World Geothermal Congress 2015* (pp. 19-24).  
<http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/makalinao1/docs/01053.pdf>  
*Geothermal Data Repository (GDR).* (s. f.). GDR.  
<https://gdr.openei.org/pfa#browseData>
- Gobierno de Canarias (2017). *Estrategia Energética de Canarias 2015-2025 (EECAN25)*  
[https://occet.es/wp-content/uploads/2022/09/EECan25\\_DocumentoPreliminar\\_junio2017.pdf](https://occet.es/wp-content/uploads/2022/09/EECan25_DocumentoPreliminar_junio2017.pdf)
- Gupta, H. K., & Roy, S. (2006). *Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century.* Elsevier.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3sOyhcp5eZYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Gupta,+H.+y+Roy,+S.,+2007.+Geothermal+energy:+an+alternative+resource+for+the+21st+century.++Elsevier,+Amsterdam,+p.+1-59&ots=Aqgp2hWRd-&sig=3ox-k\\_LvrMqywXUzGUn7Nla\\_esI#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3sOyhcp5eZYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Gupta,+H.+y+Roy,+S.,+2007.+Geothermal+energy:+an+alternative+resource+for+the+21st+century.++Elsevier,+Amsterdam,+p.+1-59&ots=Aqgp2hWRd-&sig=3ox-k_LvrMqywXUzGUn7Nla_esI#v=onepage&q&f=false)
- Gobiernodecanarias.org (S/f) *Alta, media y baja entalpía: Generación de electricidad y aprovechamiento directo del calor.*

[https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/images/Documentos/Estudios/GEOTERMIA-ALTA-D2\\_V1.pdf](https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/images/Documentos/Estudios/GEOTERMIA-ALTA-D2_V1.pdf)

Gran Enciclopedia Virtual Islas Canarias. (s. f.). *Relieve - TENERIFE*.

[https://www.gevic.net/info/contenidos/mostrar\\_contenidos.php?idcat=36&idcap=58&idcon=332](https://www.gevic.net/info/contenidos/mostrar_contenidos.php?idcat=36&idcap=58&idcon=332)

Gómez Arias, E., & González Fernández, A. (2017). *La geotermia como energía renovable y sustentable en México. Serie Ponencias: Madrid, Spain, 135-152*.

<https://www.researchgate.net/profile/Luis-Cervera->

[Gomez/publication/322701637\\_Diagnostico\\_del\\_recurso\\_solar\\_y\\_el\\_desarrollo\\_economico\\_y\\_social\\_del\\_Valle\\_de\\_Juarez\\_Chihuahua\\_Pp\\_59/links/5a6a2c18a6fdccf88497c8ec/Diagnostico-del-recurso-solar-y-el-desarrollo-economico-y-social-del-Valle-de-Juarez-Chihuahua-Pp-59.pdf#page=145](https://www.researchgate.net/publication/322701637_Diagnostico_del_recurso_solar_y_el_desarrollo_economico_y_social_del_Valle_de_Juarez_Chihuahua_Pp_59/links/5a6a2c18a6fdccf88497c8ec/Diagnostico-del-recurso-solar-y-el-desarrollo-economico-y-social-del-Valle-de-Juarez-Chihuahua-Pp-59.pdf#page=145)

Gehring, Magnus; Loksha, Victor. 2012. *Manual de Geotermia: Cómo Planificar y Financiar la Generación de Electricidad*. ESMAP

<https://www.esmap.org/node/3616>

Germán Cervigón (2020) *De la excursión, G. Ríos de lava buscando un puerto*. Usal.es.

[https://sge.usal.es/archivos\\_pdf/geolodia20/guias\\_geolodia20/gdia20guia\\_tenerife.pdf](https://sge.usal.es/archivos_pdf/geolodia20/guias_geolodia20/gdia20guia_tenerife.pdf)

Ito, G., Frazer, N., Lautze, N., Thomas, D., Hinz, N., Waller, D., ... & Wallin, E. (2017).

*Play fairway analysis of geothermal resources across the state of Hawaii: 2.*

*Resource probability mapping. Geothermics, 70, 393-405.*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375650516301407>

ITER (2024) *ITER y DISA obtienen 43,1 millones de euros para realizar proyectos de geotermia en Tenerife*. ITER - Instituto Tecnológico y de Energías Renovables,

S.A; Instituto Tecnológico y de Energías Renovables SA. <https://www.iter.es/iter-y-disa-obtienen-431-millones-de-euros-para-realizar-proyectos-de-geotermia-en-tenerife/>

Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE) y el Instituto geológico y Minero de España (IGME) (2008) *Manual de Geotermia*.  
[https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones\\_idae/documentos\\_10952\\_manual\\_geotermia\\_a2008\\_e3bf1e59.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10952_manual_geotermia_a2008_e3bf1e59.pdf)

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (s.f). *La energía geotérmica*.  
<https://www.igme.es/geotermia/Ficheros%20PDF/MasInfor/Folleto%20color.pdf>

Instituto Tecnológico de Canarias, S.A (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias*  
[https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/images/Documentos/Estudios/D5\\_Estrategia\\_Geotermia\\_Canarias.pdf](https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/images/Documentos/Estudios/D5_Estrategia_Geotermia_Canarias.pdf)

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1985) *ANALISIS METODOLOGICO DE LAS TÉCNICAS GEOQUÍMICAS EMPLEADAS EN PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA*.  
[https://info.igme.es/SidPDF/035000/001/Analisis%20metodologico%20de%20las%20tecnicas%20geoquimicas%20empleadas%20en%20prospeccion%20geotermica/35001\\_0001.pdf](https://info.igme.es/SidPDF/035000/001/Analisis%20metodologico%20de%20las%20tecnicas%20geoquimicas%20empleadas%20en%20prospeccion%20geotermica/35001_0001.pdf)

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1993). *Investigación geotérmica en el área central de la isla de Tenerife. Informe final*. Madrid.

IPCC (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo*.  
<https://lc.cx/E7Jzjl>

Ito, G., Frazer, N., Lautze, N., Thomas, D., Hinz, N., Waller, D., Whittier, R. & Wallin, E. (2017). Play fairway analysis of geothermal resources across the state of

Hawaii: 2. Resource probability mapping. *Geothermics*, 70, 393-405.

<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.11.004>

Jarabo Friedrich, Francisco et.al (1988) *El libro de las energías renovables*.

<https://www.grupoblascabrera.org/webs/ficheros/08%20Bibliograf%C3%ADa/08%20Renovables/04%20El%20libro%20de%20las%20energ%C3%ADas%20renovables.pdf>

Lautze, N., Ito, G., Thomas, D., Frazer, N., Martel, S. J., Hinz, N., Tachera, D., Hill, G., Pierce, H. A., Wannamaker, P. E., & Martin, T. (2020). *Play Fairway analysis of geothermal resources across the State of Hawai‘i: 4. Updates with new groundwater chemistry, subsurface stress analysis, and focused geophysical surveys*. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101798>

Lautze, N., Thomas, D., Hinz, N., Apuzen-Ito, G., Frazer, N., & Waller, D. (2017). Play fairway analysis of geothermal resources across the State of Hawaii: 1. Geological, geophysical, and geochemical datasets. *Geothermics*, 70, 376-392. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.02.001>

Limberger, J., Boxem, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., ... & van Wees, J. D. (2018). *Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 961-975. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313345>

Lago, M., Sanz, T., & Majarena, U. (2015). El vulcanismo y su potencial geotérmico: perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(1), 80-80. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5424181>

Lachmar, TE, Neupane, G., Garg, SK et al. *Validación del análisis Play Fairway del potencial geotérmico de Camas Prairie, centro-sur de Idaho, mediante un*

pozo de exploración. *Energía geotérmica* 11 , 21 (2023).

<https://doi.org/10.1186/s40517-023-00264-4>

Martínez, A. (2024). *Un error del anterior Gobierno regional retrasa el desarrollo de la geotermia en Gran Canaria*. *Atlántico Hoy*.

[https://www.atlanticohoy.com/economia/error-anterior-gobierno-retrasa-desarrollo-geotermia-en-gran-canaria\\_1527720\\_102.html](https://www.atlanticohoy.com/economia/error-anterior-gobierno-retrasa-desarrollo-geotermia-en-gran-canaria_1527720_102.html)

Maxwell, S. (2009). *Microseismic location uncertainty*. *CSEG Recorder*.

[https://www.researchgate.net/publication/229040728\\_Microseismic\\_Location\\_Uncertainty](https://www.researchgate.net/publication/229040728_Microseismic_Location_Uncertainty)

Mercado, S., Arellano, V. M., & Barragán, R. M. (2007). *Medio ambiente, geotermia y toma de conciencia*. *GEOTERMIA*, 77.

[https://www.googlenergy.com/castellano/auxiliar/UEG\\_Mediateca\\_Documento\\_90.pdf#page=79](https://www.googlenergy.com/castellano/auxiliar/UEG_Mediateca_Documento_90.pdf#page=79)

Méndez, C. A. O., Armenta, M. F., Silva, G. R. (2011). *Potencial geotérmico de la República Mexicana*. *Geotermia*, 24(1), 50-8.

<https://publications.mygeoenergynow.org/journals/Geotermia-Vol24-1.pdf#page=52>

Montesdeoca-Martínez, F., & Velázquez-Medina, S. (2023). *Geothermal energy exploitation in an island-based 100% renewables strategy. Case study of Tenerife (Spain)*. *Journal of Cleaner Production*.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.13913>

Piña-Varas, P., Ledo Fernández, J., Queralt i Capdevila, P., Marcuello Pascual, A., Mitjanas Colls, G., & Martínez Van Dorth, D. (2023). *Magnetotelluric applied to deep geothermal exploration: Canary Islands*. *Boletín Geológico y Minero*, 2023, vol. 134, num. 3, p. 49-58.



- Pierce, V. (2011). *Introduction to geothermal power*. World Technologies.  
<https://www.overdrive.com/media/794793/introduction-to-geothermal-power>
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. (s. f.). *Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*.  
<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html>
- Rodríguez, F., Pérez, N. M., Melián, G. V., Padrón, E., Hernández, P. A., Asensio-Ramos, M., Padilla, G. D., Barrancos, J., & D'Auria, L. (2021). *Exploration of deep-seated geothermal reservoirs in the Canary Islands by means of soil CO<sub>2</sub> degassing surveys*. *Renewable Energy*, 164, 1017–1028.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.065>
- Reglamento - 2018/1999 - ES - EUR-LeX. (s. f.). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj?locale=es>
- Santamarta, J. C., García-Gil, A., del Cristo Expósito, M., Casañas, E., Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Martín, J., ... & Gemeni, V. (2021). *The clean energy transition of heating and cooling in touristic infrastructures using shallow geothermal energy in the Canary Islands*. *Renewable Energy*, 171, 505-515.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121002846>
- Sánchez Alvarado, E. J., León Gómez, S. T., & Vargas Soto, C. A. (2021). *Análisis del caso de éxito del proyecto de transformación energética de Islandia* (Bachelor's thesis, Especialización en Gerencia de Proyectos-Virtual).  
<https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/10351>
- Sánchez, E. J., León, S. T. & Vargas, C. A. (2020). *Análisis del caso de éxito del proyecto de transformación energética de Islandia* [Tesis de especialización, Universidad EAN]. <http://hdl.handle.net/10882/10351>.

- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. y Stix, J., 2000. *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego Ca., p. 643-662.  
<https://www.researchgate.net/publication/341113925> Caracterización petrográfica y geoquímica de una sección del subsuelo en el campo geotérmico de Los Hornos Puebla el caso del pozo H-42
- Shervais, J. W., DeAngelo, J., Glen, J. M., Nielson, D. L., Garg, S., Dobson, P., Gasperikova, E., Sonnenthal, E., Liberty, L.M., Newell, D.L., Siler, D. & Evans, J. P. (2024). *Geothermal play fairway analysis, part 1: Example from the Snake River Plain, Idaho*. *Geothermics*, 117, 102865.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102865>
- Tomás García Ruiz (2022) *Solicitud de un permiso de investigación en la zona sur de Lanzarote para geotermia de alta entalpía (electro-lanzarote)*.  
[https://www.gobiernodecanarias.org/cmsgob2/export/sites/industria/temas/minas/Electrolanzarote/memoria\\_inicial\\_de\\_la\\_solicitud\\_PL.pdf](https://www.gobiernodecanarias.org/cmsgob2/export/sites/industria/temas/minas/Electrolanzarote/memoria_inicial_de_la_solicitud_PL.pdf)
- Yasukawa, K., Ishido, T., & Suzuki, I. (2005). *Geothermal reservoir monitoring by continuous self-potential measurements, Mori geothermal field, Japan*. *Geothermics*, 34(5), 551-567. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.04.005>