

RESEARCH ARTICLE

Application of electric and electromagnetic methods, combined with thermal properties analysis, to the characterization of low and medium enthalpy geothermal resources

Aplicación de métodos eléctricos y electromagnéticos, combinados con el análisis de propiedades térmicas, a la caracterización y del recurso geotérmico de baja y media entalpía

Ignacio Martín Nieto¹, Cristina Sáez Blázquez¹, Arturo Farfán Martín¹, Pedro Carrasco García¹, Diego González-Aguilera¹

¹ Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, España.

Corresponding author: nachomartin@usal.es (Ignacio Martín Nieto)

ABSTRACT

The relationship between the thermal properties of the ground and the efficiency of geothermal installations located in the ground is well known. The different geologies and subsurface structures have a decisive influence on the behavior of a given location with respect to heat exchanges. The electrical and electromagnetic methods of geophysical prospecting can be useful in determining the compositions and structures present in a given area in order to be able to perform energy modeling that will help to design more precisely the ideal geothermal heat exchanger for that area. In this work we study the relationship, observed in different studies, between the geological structure and the electromagnetic magnitude measurements collected from these prospecting methods. Possibilities are also explored in contact with the idea of relating electromagnetic and thermal magnitudes in the search for new ideas to develop more accurate methods of geophysical prospecting of the geothermal resource.

Key points

Relationship between specific geological environments and the possibility of connection between thermal and electromagnetic properties.

Suggestion of connections between electromagnetic and thermal properties, application of known laws in other fields to geophysical prospecting.

Possible applications of the suggested connections.

Keywords: Electromagnetism; Thermal Properties; Geophysical Prospecting.

Article History:

Received: 13/03/2023

Accepted: 26/07/2023

RESUMEN

La relación entre las propiedades térmicas del terreno y la eficiencia de las instalaciones geotérmicas situadas en el mismo es bien conocida. Las diferentes geologías y estructuras del subsuelo tienen una influencia decisiva en el comportamiento de una determinada localización frente a los intercambios de calor. Los métodos eléctricos y electromagnéticos de prospección geofísica pueden ser de utilidad a la hora de determinar las composiciones y estructuras presentes en una determinada área con el fin de poder realizar modelizaciones energéticas que ayuden a diseñar de forma más precisa el intercambiador de calor geotérmico ideal para esa área. En este trabajo se estudia la relación, observada en diferentes estudios realizados, entre la estructura geológica y las medidas de magnitudes electromagnéticas recogidas desde estos métodos de prospección. También se exploran posibilidades en contacto con la idea de relacionar magnitudes electromagnéticas y térmicas en la búsqueda de nuevas ideas para desarrollar métodos más precisos de prospección geofísica del recurso geotérmico.

Puntos clave

Relación entre entornos geológicos concretos y posibilidad de conexión entre propiedades térmicas y electromagnéticas.

Sugerencia de conexiones entre propiedades electromagnéticas y térmicas, aplicación de leyes conocidas en otros ámbitos a la prospección geofísica.

Posibles aplicaciones de las conexiones sugeridas.

Palabras clave: Electromagnetismo; Propiedades Térmicas; Prospección Geofísica.

Historial del artículo:

Recibido: 13/03/2023

Aceptado: 26/07/2023

1. Introducción

La importancia de la caracterización de las propiedades térmicas del terreno, en donde se pretende ubicar un campo de captación geotérmica, ha sido puesta de manifiesto en numerosos trabajos. Dentro del entorno de la aplicación de técnicas geofísicas en la caracterización de recursos geotérmicos, los métodos eléctricos y electromagnéticos han tenido una amplia difusión. Esto a pesar de que, en origen, los métodos de exploración eléctrica del subsuelo, sobre todo en lo referente al sondeo eléctrico vertical (SEV) y a la tomografía eléctrica, han sido fundamentalmente utilizados en áreas como: hidrogeología, geotecnia (edificación, obra civil), contaminación ambiental subterránea, arqueología, y en general la localización de estructuras y anomalías complejas en el subsuelo, tanto geológicas como antrópicas.

La conductividad térmica de las rocas depende de varios factores, incluida la porosidad, la fracturación, la composición y la estructura mineral. Muchos estudios han demostrado la importancia de la porosidad y la fracturación en la conductividad térmica de la roca y han demostrado que entre estas propiedades existe una relación complicada, que depende particularmente de la estructura del espacio poroso (Robertson, 1988).

La posibilidad de aplicación de los métodos eléctricos y electromagnéticos de prospección a la caracterización de las propiedades térmicas del terreno, surge a partir de la posibilidad de correlacionar características de áreas geológicas de las que se tiene cierto conocimiento (mapas geológicos, sondeos cercanos, etc.) con una respuesta esperada respecto de la resistividad eléctrica que pueden presentar. Esto hace que se pueda después interpretar los resultados de los ensayos con estos métodos geofísicos en clave de respuesta termodinámica. De esta forma, se hace necesario proceder al análisis en laboratorio de muestras del área del proyecto para medir la resistividad eléctrica y la conductividad térmica, con el fin de establecer dicha relación de forma precisa.

Asimismo, como reflexiones surgidas de lo anterior, se presentan en este trabajo una serie de ideas, relacionadas con la posibilidad de utilizar la relación entre magnitudes térmicas y electromagnéticas establecidas para otros campos de conocimiento, a la caracterización geofísica. Con especial interés en la caracterización del recurso geotérmico, pero sin olvidar otras posibilidades de aplicación que son comentadas también.

2. Ejemplo comentado de aplicación de la relación entre magnitudes eléctricas y térmicas

Merece la pena comentar en detalle el desarrollo que se llevó a cabo (Nieto *et al.*, 2019) para establecer un modelo 3D de comportamiento térmico del terreno a partir de ensayos eléctricos en un entorno granítico (adamellítico). En este trabajo se puso de manifiesto, mediante consultas de trabajos previos y ensayos en laboratorio, que, en el proceso de alteración de las rocas tipo granito, y las adamellitas en particular, se puede establecer una relación entre la resistividad eléctrica por un lado y la conductividad térmica y el grado de alteración por otro. Esto significa que utilizando los datos de la tomografía eléctrica podemos evaluar de manera aproximada esos parámetros.

Para llegar a esto hay que hacer una serie de consideraciones sobre el entorno geológico en que se desarrollan los ensayos: La resistividad eléctrica de las rocas tipo granito tiene un comportamiento directamente proporcional al estado de alteración que presenten (Kolditz, 1995), por otro lado, la conductividad térmica de estas rocas se comporta inversamente proporcional al mismo. Este comportamiento se debe en parte al aumento del contenido de arcilla, que proviene del feldespato, típico del proceso de meteorización *in situ* de este tipo de rocas. Las rocas de tipo granito (como las adamellitas) sufren frecuentemente una desagregación debida únicamente a la meteorización “*in situ*” (como en el caso presente) o por procesos erosivos completos con meteorización y transporte. En las rocas compuestas por diferentes minerales de grano grande (como el granito, por ejemplo) la meteorización ataca al primero, el mineral más débil. Especialmente los enlaces entre los minerales pierden estabilidad. Al final, la roca se descompone en un conjunto de granos sueltos. En el proceso de meteorización de los granitos aparecen materiales arcillosos provenientes de la desintegración de los feldespatos (con baja conductividad térmica en comparación con la roca granítica sana). Esto, junto con el hecho de que aumenta la porosidad y la fractura, hace que la conductividad térmica se reduzca en las distintas etapas de meteorización de este tipo de rocas (Robertson, 1988).

Al mismo tiempo, la resistividad eléctrica también disminuye a medida que avanza la meteorización, en parte debido a la aparición progresiva de material arcilloso. También existe la contribu-

ción de la humedad en las fracturas y poros que también ayuda en la reducción de la resistividad eléctrica. De forma que es necesario proceder al análisis en laboratorio de muestras del área del proyecto para medir la resistividad eléctrica y la conductividad térmica, con el fin de establecer dicha relación de forma precisa.

Así, mediante el análisis en laboratorio de muestras recogidas es posible establecer una correspondencia entre la resistividad y la conductividad térmica de los materiales geológicos de la zona de estudio en concreto. Esto permite extender el modelo 3D conseguido interpolando los datos de las tomografías eléctricas en paralelo a un modelo 3D de conductividades térmicas que hace de marco de referencia para el diseño del campo de captación geotérmico de forma más precisa. Asimismo, se pueden establecer los lugares y métodos de perforación más adecuados (rotoperforación, rotación, etc.) para los sondeos geotérmicos reduciendo los riesgos asociados a estas operaciones.

3. Ideas en conexión con la relación entre las propiedades electromagnéticas y térmicas de los materiales geológicos

Las propiedades electromagnéticas y térmicas de las rocas son parámetros importantes que pueden proporcionar información sobre la composición, la estructura y las propiedades del subsuelo. Estas propiedades pueden medirse mediante diversas técnicas geofísicas, los métodos electromagnéticos quizá sean la forma más directa, pero existen otras aproximaciones como los métodos gravimétricos, los basados en lecturas de detección de muones, etc. Las propiedades electromagnéticas de las rocas incluyen la conductividad eléctrica, la permisividad dieléctrica y la susceptibilidad magnética. Las propiedades térmicas de las rocas incluyen la conductividad térmica, la difusividad térmica y la capacidad calorífica específica. En este trabajo analizaremos las posibilidades que podrían surgir de las relaciones entre las propiedades electromagnéticas y térmicas de las rocas y su importancia en la exploración geofísica.

La relación entre las propiedades electromagnéticas y térmicas de las rocas es compleja (Chiang *et al.*, 2008) y está influida por diversos factores como la mineralogía, la porosidad, la temperatura y la saturación de fluidos. Las pro-

piedades térmicas de las rocas están relacionadas con la forma en que el calor se transfiere a través de la roca, mientras que las propiedades electromagnéticas están relacionadas con la forma en que los campos eléctricos y magnéticos interactúan con ella.

3.1. Relación entre la conductividad eléctrica y la conductividad térmica en las rocas

La conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las rocas son dos propiedades físicas importantes que están estrechamente relacionadas. La conductividad eléctrica mide la capacidad de un material para conducir la electricidad, mientras que la conductividad térmica se ocupa de la capacidad de un material para conducir el calor. La relación entre estas dos propiedades en las rocas puede proporcionar información valiosa sobre su composición, estructura y propiedades térmicas, que puede aplicarse a diversos campos de estudio.

La relación entre la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las rocas podría aproximarse (bajo ciertas circunstancias a estudiar en futuras investigaciones, ya que su ámbito de aplicación usual es en materiales fundamentalmente metálicos) mediante la ley de Wiedemann-Franz (1), que establece que la relación entre la conductividad térmica y la conductividad eléctrica es proporcional a la temperatura. Esto significa que a medida que aumenta la temperatura de una roca, también aumentará la relación entre su conductividad térmica y su conductividad eléctrica.

$$\frac{\kappa}{\sigma} = L \cdot T \quad (1)$$

Donde:

κ (W/m·K) conductividad térmica

σ (S/m) conductividad eléctrica

Esta relación puede explicarse por el hecho de que tanto la conductividad eléctrica como la conductividad térmica están influidas por la movilidad de los electrones en el material (Cosenza *et al.*, 2003). En los metales, que tienen una conductividad eléctrica alta, los electrones se mueven libremente, lo que también les permite transportar calor. En los aislantes, que tienen una conductividad eléctrica baja, los electrones están fuertemente ligados a sus átomos y no pueden mover-

se libremente, lo que limita su capacidad para conducir el calor.

En las rocas, la conductividad eléctrica depende principalmente de la concentración de iones en el material, mientras que la conductividad térmica depende de la concentración de minerales y de sus propiedades térmicas. Por lo tanto, la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las rocas están relacionadas con su composición química, mineralogía y porosidad. La relación entre la concentración de iones (detectada por métodos geofísicos electromagnéticos) y la composición mineralógica de un determinado material geológico puede ser de interés como método de detección indirecto.

3.2. Relación entre la permitividad eléctrica y la difusividad térmica en las rocas

La permitividad eléctrica y la difusividad térmica son propiedades físicas que influyen significativamente en el comportamiento electromagnético y en las características térmicas de los materiales geológicos. Estas propiedades pueden proporcionar información valiosa sobre las rocas, incluidas su composición y estructura. Podría ser de interés en el futuro explorar la relación entre la permitividad dieléctrica y la difusividad térmica en las rocas y su importancia en diversos campos de estudio.

Permitividad dieléctrica en rocas

La permitividad dieléctrica es una medida de la capacidad de un material para ser polarizado por un campo eléctrico. En las rocas, la permitividad dieléctrica se ve influida por la presencia de granos minerales y fluidos de poros (Álvarez, 1973). De esta manera, la permitividad dieléctrica de las rocas puede proporcionar información sobre su composición y estructura. Por ejemplo, de lo anterior podemos considerar que esta magnitud está influida por la fracción volumétrica y la composición de los minerales que las componen, así como por la presencia de fluidos en los poros. Es necesario tener en cuenta también que la magnitud puede verse influida por factores como la temperatura, la presión y la frecuencia del campo eléctrico. La permitividad dieléctrica de las rocas se expresa a menudo como permitividad relativa, que es la relación entre la permitividad de la roca y la permitividad del espacio libre.

Difusividad térmica en rocas

La difusividad térmica es una medida de la capacidad de un material para conducir el calor a través de su volumen. En las rocas, la difusividad térmica se ve influida por la distribución en la misma de las distintas mineralizaciones, así como la composición y dinámica de los fluidos en los poros y fracturas. Esta magnitud, además de proporcionar información sobre las propiedades térmicas puede utilizarse para intentar deducir la historia térmica de la roca, acercarnos a datos tales como el momento y la temperatura de formación o metamorfismos sufridos (Vosteen and Schellschmidt, 2003). La difusividad térmica de las rocas suele expresarse en unidades de metros cuadrados por segundo.

Relación entre la permitividad dieléctrica y la difusividad térmica en rocas

La relación entre la permitividad dieléctrica y la difusividad térmica en las rocas es compleja y está influida por diversos factores. Sin embargo, se pueden hacer algunas observaciones generales sobre la relación entre estas dos propiedades:

- La presencia de fluidos porosos en las rocas puede influir significativamente tanto en su permitividad dieléctrica como en su difusividad térmica. La permitividad dieléctrica de las rocas está influida por las propiedades dieléctricas del fluido de los poros, que pueden variar en función de la composición y la temperatura del fluido. La difusividad térmica de las rocas está influenciada por las propiedades térmicas del fluido en los poros, incluyendo su conductividad térmica y capacidad calorífica.
- La relación entre la permitividad dieléctrica y la difusividad térmica en las rocas también se ve influida por el tipo de roca estudiada. Por ejemplo, las rocas con alta difusividad térmica tienden a tener baja permitividad dieléctrica, mientras que las rocas con alta permitividad dieléctrica tienden a tener baja difusividad térmica. Esto se debe a que los mecanismos que rigen la transferencia de calor y la polarización de un material suelen ser diferentes, y los factores que afectan a una propiedad pueden no afectar a la otra de la misma manera.

3.3. Relación entre la susceptibilidad magnética y la capacidad calorífica específica de las rocas

La susceptibilidad magnética y la capacidad calorífica específica son dos magnitudes físicas de las rocas que también presentan relación. La susceptibilidad magnética mide el grado de magnetización de un material cuando se coloca en un campo magnético, mientras que la capacidad calorífica específica mide la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura de un material. La relación entre estas dos propiedades en las rocas puede proporcionar valiosos conocimientos sobre su composición, estructura y propiedades magnéticas, que podrían aplicarse a diversos campos de estudio.

Relación entre la susceptibilidad magnética y la capacidad calorífica específica

La relación entre la susceptibilidad magnética y la capacidad calorífica específica de las rocas quizá podría describirse mediante una aproximación similar a la de la ley de Curie-Weiss (2), que establece que la susceptibilidad magnética de un material es proporcional a su capacidad calorífica específica. Esto significa que a medida que aumenta la capacidad calorífica específica de éste, también aumenta su susceptibilidad magnética.

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (2)$$

Dónde:

χ susceptibilidad magnética (adimensional)

C (K) constante de Curie

T (K) temperatura

T_c (K) temperatura de Curie

Esta relación puede explicarse por el hecho de que tanto la susceptibilidad magnética como la capacidad calorífica específica están influidas por las propiedades magnéticas y térmicas del material. En los materiales magnéticos, la susceptibilidad magnética se ve influida por la presencia de electrones no apareados, que pueden interactuar con un campo magnético. En cuanto a aspectos térmicos, la capacidad calorífica específica depende de la energía térmica necesaria para excitar los átomos del material.

En las rocas, la susceptibilidad magnética está influida principalmente por la concentración de

minerales magnéticos, como magnetita y hematitas (Uyeda *et al.*, 1963), mientras que la capacidad calorífica específica está influida por las composiciones de sus concentraciones de minerales y sus propiedades térmicas respectivas (Waples and Waples, 2004). Por lo tanto, la susceptibilidad magnética y la capacidad calorífica específica de las rocas están relacionadas con su composición química, mineralogía y propiedades magnéticas. Una vez más, la información recogida de una de las magnitudes, podría ser interesante para hacer estimaciones respecto de su par.

4. Posibilidades de aplicación de estas relaciones

4.1. Conductividad eléctrica y conductividad térmica

Energía geotérmica

Una de las aplicaciones más importantes de la relación entre la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las rocas es la exploración y el desarrollo de la energía geotérmica. Los sistemas geotérmicos suelen encontrarse en regiones de gran flujo de calor, como volcanes, géiseres y fuentes termales. La conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las rocas pueden utilizarse para caracterizar en detalle estas regiones y estimar la temperatura y el flujo de calor zonal en el subsuelo. Midiendo la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las rocas, los geofísicos pueden determinar las propiedades térmicas de las rocas, como su conductividad térmica, capacidad calorífica y difusividad térmica. Esta información puede utilizarse para evaluar el potencial de un recurso geotérmico, optimizar el diseño de sistemas geotérmicos y controlar el rendimiento de los pozos geotérmicos.

Exploración minera

La relación entre la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las rocas también puede aplicarse a la exploración minera. En muchas ocasiones, los yacimientos minerales suelen asociarse a una conductividad eléctrica y una conductividad térmica elevadas, que pueden utilizarse para identificar de forma más exacta sus localizaciones. Por ejemplo, las menas de sulfuro, comunes en muchos tipos de yacimientos minerales, tienen una conductividad eléctrica y una conductividad térmica elevadas debido a su con-

tenido metálico. Estas propiedades pueden utilizarse para distinguir entre distintos tipos de mineralización local.

Vigilancia medioambiental

La relación entre la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las rocas también puede aplicarse a la vigilancia medioambiental. La conductividad eléctrica de las rocas puede utilizarse para controlar la calidad de las aguas subterráneas, ya que la concentración de iones disueltos en el agua afecta a su conductividad eléctrica. Además, la conductividad térmica de las rocas puede utilizarse para controlar la temperatura del subsuelo, lo que puede proporcionar información valiosa para la gestión de los recursos naturales, como recurso geotérmico ligado a las aguas subterráneas.

4.2. Permisividad dieléctrica y difusividad térmica en rocas

Exploración geofísica

En los estudios electromagnéticos, las corrientes inducidas y los campos magnéticos del subsuelo se ven influidos por la conductividad eléctrica, la permitividad dieléctrica y la difusividad térmica de los materiales. Midiendo estos campos electromagnéticos, se pueden deducir tanto la estructura geológica del subsuelo como la posibilidad de existencia de yacimientos minerales. La permitividad dieléctrica y la difusividad térmica de las rocas pueden utilizarse para cartografiar las estructuras del subsuelo, incluida la distribución de minerales, fracturas y fluidos. La relación entre estas propiedades también puede utilizarse para estudiar la porosidad y permeabilidad de las rocas, que son factores importantes en la exploración de petróleo y gas.

Propiedades térmicas y datación de las rocas

Como se mencionó anteriormente, la relación entre la permitividad dieléctrica y la difusividad térmica de las rocas también puede utilizarse para estudiar sus propiedades térmicas y su historia. La difusividad térmica de una roca está influida por su composición, porosidad y la presencia de fluidos, mientras que la permitividad dieléctrica está influida por la fracción volumétrica y la composición de los minerales constitu-

yentes y la presencia de fluidos en los poros. De esta forma, midiendo la difusividad térmica y la permitividad dieléctrica de las rocas, se pueden determinar su conductividad térmica, su capacidad calorífica y su difusividad térmica. Esta información puede utilizarse para estudiar la historia térmica de las rocas, incluyendo su tiempo y temperatura de formación, metamorfismo y diagénesis. Por ejemplo, la difusividad térmica y la permitividad dieléctrica pueden utilizarse para identificar anomalías térmicas, como fallas y fracturas, que pueden proporcionar información sobre los procesos geológicos que han tenido lugar.

Vigilancia medioambiental

Esta relación también puede aplicarse a la vigilancia medioambiental. La difusividad térmica de las rocas puede utilizarse para medir la temperatura del subsuelo, lo que puede proporcionar información valiosa para el seguimiento y la gestión de recursos naturales, como el estado de las aguas subterráneas. Además, la permitividad dieléctrica de las rocas puede utilizarse para estudiar la distribución de fluidos en el subsuelo, incluidas las estructuras de acuíferos, lo que puede ser importante para comprender y gestionar los recursos hídricos.

4.3. Susceptibilidad magnética y capacidad calorífica específica de las rocas

Prospección minera

Una de las aplicaciones más importantes de la relación entre la susceptibilidad magnética y la capacidad calorífica específica de las rocas es la exploración minera. Los yacimientos minerales pueden asociarse a una susceptibilidad magnética y una capacidad calorífica específica elevadas, que pueden utilizarse para localizarlos. Por ejemplo, los depósitos de hierro, comunes en muchos tipos de yacimientos minerales, tienen una susceptibilidad magnética y una capacidad calorífica específica muy elevadas debido a su contenido en dicho metal.

Investigación geológica

La susceptibilidad magnética de las rocas puede utilizarse para controlar la presencia de minerales magnéticos, que pueden proporcionar infor-

mación valiosa sobre la historia geológica de una determinada localización.

5. Conclusiones

La relación entre las propiedades electromagnéticas y térmicas de las rocas de forma general, podría ser un área de investigación con una amplia gama de aplicaciones en el futuro. Mediante la determinación de estas propiedades, resulta posible obtener información valiosa sobre la composición, la estructura y las propiedades de los materiales geológicos. Esta información puede aplicarse a diversos campos de estudio, como la energía geotérmica, la exploración minera o la vigilancia del medio ambiente. El hecho de encontrar relaciones entre estas magnitudes, puede facilitar la estimación de unas a través de medidas directas de las otras. Esto puede ser de interés teniendo en cuenta que, de forma general, las propiedades electromagnéticas son, hoy por hoy, más fácilmente medibles en estudios de campo que las propiedades térmicas (tanto en cuanto a extensiones medidas como en cuanto a facilidad de efectuar las mismas). Aquí se han presentado algunas ideas relacionadas con la forma de abordar el estudio de estas relaciones, a veces a través de los avances en otros ámbitos (Ley de Curie-Weiss) que podrían ser de aplicación adaptada al entorno geológico; y otras por medio de relaciones de comportamiento subatómico (ley de Wiedemann-Franz) posiblemente adaptables también a los materiales del subsuelo. Es intención de los autores continuar investigando las diferentes posibilidades que ofrecen estas relaciones de forma más concreta en futuros trabajos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto “Desarrollo e integración de un nuevo sistema de calefacción urbana utilizando energía geotérmica de bajo consumo (GEO-DISTRICT 3.0)” (Ref. SA102P20) financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), bajo

la orden de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León.

Los autores agradecen también la colaboración del Grupo de Investigación TIDOP del Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de Ávila (Universidad de Salamanca).

Referencias

- Alvarez, R. (1973). Complex dielectric permittivity in rocks: A method for its measurement and analysis. *Geophysics*, 38(5), 920-940.
- Chiang, C. C., Wang, S. F., Wang, Y. R., and Hsu, Y. F. (2008). Characterizations of CaO–B₂O₃–SiO₂ glass–ceramics: thermal and electrical properties. *Journal of alloys and compounds*, 461(1-2), 612-616.
- Cosenza, P., Guerin, R., and Tabbagh, A. (2003). Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modelling. *European Journal of Soil Science*, 54(3), 581-588.
- Kolditz, O. (1995). Modelling flow and heat transfer in fractured rocks: conceptual model of a 3-D deterministic fracture network. *Geothermics*, 24 (3), 451-470.
- Nieto, I. M., Martín, A. F., Blázquez, C. S., Aguilera, D. G., García, P. C., Vasco, E. F., and García, J. C. (2019). Use of 3D electrical resistivity tomography to improve the design of low enthalpy geothermal systems. *Geothermics*, 79, 1-13.
- Robertson, E. C. (1988). Thermal properties of rocks. U. S. Geological Survey Open-File Report 88-441, p. 97.
- Uyeda, S., Fuller, M. D., Belshe, J. C., and Girdler, R. W. (1963). Anisotropy of magnetic susceptibility of rocks and minerals. *Journal of Geophysical Research*, 68(1), 279-291.
- Vosteen, H. D., and Schellschmidt, R. (2003). Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/ b/c*, 28(9-11), 499-509.
- Waples, D. W., and Waples, J. S. (2004). A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. Part 1: Minerals and nonporous rocks. *Natural resources research*, 13(2), 97-122.

