



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN
DE INGENIEROS EN LA
ERA DIGITAL



ESTUDIO COMPARATIVO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SUELO CEMENTO Y ROCAS PARA USO DE GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA

Micaela Pleitavino, Belén Costantini, Magalí E. Carro Pérez

**Universidad Nacional de Córdoba
Córdoba, Argentina**

Resumen

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie del terreno. La energía geotérmica de muy baja entalpía es la que se puede aprovechar en la zona más somera presente en el subsuelo y que es potencialmente útil para la climatización de construcciones. El uso de la geotermia y sus avances se observan en diferentes y creciente número de países en el mundo. Estos métodos de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía dependen de las mezclas mejoradas térmicamente para aumentar la conductividad alrededor de los tubos conductores de calor y de la configuración y disposición de los tubos en donde se realiza el intercambio térmico. Y es precisamente en estas mezclas donde uno de los factores más influyente es la conductividad térmica de los materiales. Es por ello que en este trabajo se estudia la conductividad térmica de diferentes materiales, comparando mezclas de suelo cemento con diferente contenido cementicio y también diferentes tipos de rocas. Se miden y estiman las conductividades térmicas de los materiales analizados y se presentan los resultados obtenidos en procesos de calentamiento y enfriamiento observados a través de cámara termográfica.

Palabras clave: termografía; propiedades térmicas; eficiencia energética

Abstract

Geothermal energy is energy stored in the form of heat under the ground surface. Very low-enthalpy geothermal energy is the one that can be used in the shallowest part of the subsoil and it is potentially useful for the air-conditioning of buildings. The advances and use of geothermal energy are observed in an increasing number of different countries in the world. These very low-enthalpy geothermal methods depend on the thermally improved mixtures to increase conductivity

around heat conducting pipes and on the configuration and arrangement of the pipes where the heat exchange takes place. One of the most influential factors in these mixtures is the thermal conductivity of the materials. Consequently, the thermal conductivity of different materials is studied; soil-cement mixtures with different cementitious content and also different types of rocks are compared. The thermal conductivities of the analyzed materials are measured and estimated and the results obtained in heating and cooling processes observed through a thermographic camera are presented.

Keywords: *thermography; thermal properties; energy efficiency*

1. Introducción

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie del terreno. La energía geotérmica de muy baja entalpía es la que se puede aprovechar en la zona más somera presente en el subsuelo, debido a su capacidad de mantener una temperatura sensiblemente constante a una determinada profundidad a lo largo de todo el año. Este tipo de energía es útil para cubrir necesidades energéticas básicas, tales como la calefacción y el calentamiento de agua sanitaria. En este sentido, la energía geotérmica aparece como una fuente particularmente atractiva, ya que su utilización se asocia a bajas tasas de emisión de gases contaminantes, y no presenta problemas de disponibilidad (de La Bernardie et al., 2017). Además, no requiere de combustión ni mecanismos de implementación que puedan llegar a incurrir en peligros, y es autosuficiente, siendo independiente de otras fuentes energéticas al momento de su utilización (Sigal et al., 2015).

Grandes avances a nivel mundial respecto al aprovechamiento de calor de la Tierra han sido desarrollados en los últimos años (Yari y Javani, 2007; de Moel et al., 2010), ya sea en roca (Brown et al., 2012; Förster et al., 2018), como así también en materiales no consolidados (Bidarmaghz et al., 2015).

Particularmente, el método considerado en la geotermia de baja entalpía es el también conocido antiguamente como de tubos provenzales o canadienses, el cual consiste en enterrar un tubo a una profundidad somera pero suficiente (entre 2 metros y 5 metros) para que sirva de intercambiador de calor y donde la temperatura del suelo no se vea afectada instantáneamente por el clima exterior, y hacer circular fluido por los tubos. Este fluido de intercambio (generalmente puede ser aire), al entrar en contacto con las paredes del tubo que se encuentran a la misma temperatura del subsuelo, siendo esta temperatura menor o mayor que la exterior, logran el enfriamiento o calentamiento del mismo y luego se hace circular el aire tratado hacia el interior del edificio. El subsuelo actúa como intercambiador de calor (Carro Pérez et al., 2018). Los factores que influyen en estos sistemas principalmente son la variación de temperatura exterior, las características del suelo o material (conductividad, propiedades, humedad, entre otros) circundante a los tubos, la longitud de los tubos y la velocidad del flujo.

El conocimiento de la conductividad térmica de los materiales del subsuelo, así como de otras propiedades térmicas, es esencial para resolver muchos problemas de diseño respecto a la

utilización de esta energía. Como mencionan Brunat y Escuer (2010), la conductividad térmica del suelo es el factor limitante más importante que se ha de tener en cuenta en el diseño de un intercambiador ya que esta propiedad servirá para determinar su dimensionado.



Figura 1. Muestras de roca. De izquierda a derecha: arenisca, granito y migmatita.

La capacidad térmica de los materiales constructivos utilizados en estos sistemas tiene una gran influencia en los procesos de transmisión de calor en régimen transitorio, determinando el fenómeno de la inercia térmica definida por el retardo y amortiguación de la onda de calor, y favoreciendo la estabilidad térmica del ambiente interior de los edificios (Mosquera, 2013).

2. Materiales y métodos

Los ensayos realizados en el presente trabajo se llevaron a cabo sobre muestras de diferentes tipos de rocas y sobre muestras de suelo con distintos porcentajes de cemento.



Figura 2. Muestras de suelo con 9%, 6% y 3% de cemento de izquierda a derecha.

Se seleccionaron tres muestras de roca (Figura 1), cada una con un origen diferente. Una arenisca, un granito, y una migmatita. Estas rocas pertenecen a tres de los grupos litológicos mayoritarios de las Sierras de Córdoba, Argentina. Para su caracterización, se realizó una descripción macroscópica de las mismas.

La arenisca está conformada por granos de arena fina a muy fina, presentando una coloración marrón-rojiza. La estratificación aparece poco marcada. El granito corresponde a un granito de dos micas, formado principalmente por Qtz, Kfs, Pl, Ms y Bt. Leucocrático, equigranular de tamaño de grano medio, no foliado, de fábrica isótropa, con un grado de meteorización media a avanzada. La migmatita está formada principalmente por Pl, Qtz, Kfs y de forma secundaria Bt. De coloración mesocrática, con tamaño de grano muy grueso, de estructura bandeada curva. No presenta signos de meteorización.

También se evaluaron tres muestras de suelo-cemento (Figura 2) con diferentes porcentajes de cemento, siendo éstos 9%, 6% y 3% respectivamente. El suelo-cemento es una mezcla homogénea de suelo al que se le incorporan determinadas cantidades de cemento portland y agua, que luego es compactado para obtener densidades altas, y curado, para que se produzca un endurecimiento más efectivo obteniendo un nuevo material que es altamente resistente a los esfuerzos de compresión además es impermeable, estable en el tiempo y con un adecuado comportamiento térmico (Toirac, 2008). Este tipo de compuesto funciona adecuadamente para ser utilizado como relleno de las perforaciones en las que se insertan los tubos para realizar el

intercambio de calor en el proceso energético. Las mismas fueron realizadas en un molde tripartido de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura, se elaboraron realizando cuatro capas con la misma energía de compactación, ya que el molde permite obtener una muestra de dimensiones óptimas para las mediciones de conductividad térmica (mínimo 51 mm de diámetro) norma ASTM D-5334, pero también obtener densidades muy próximas con un error de 2 % al de las muestras Próctor Estándar ajustando la cantidad de capas y golpes. El molde utilizado fue revestido con una lámina de acetato para evitar la adherencia al mismo en el proceso de compactación. Las muestras fueron preparadas con un suelo pasante el tamiz N°200, aplicando las cantidades de agua y cemento requeridas conforme a cada probeta y luego se las dejó reposar 24 horas en la cámara húmeda del laboratorio para homogenizar y asegurar la hidrólisis del cemento en las muestras. Para la inserción del sensor de aguja se realizó una perforación de 1.5mm de espesor por 60mm de largo en el momento de su elaboración. Luego las muestras fueron medidas a los 28 días.

En cuanto a los métodos utilizados, la medición de conductividad térmica (CT) de las muestras de material se realizó mediante la técnica de la aguja de calentamiento siguiendo los pasos enunciados en la norma ASTM D-5334 (ASTM; 2007), no solo para la determinación puntual de la medición sino también para la calibración previa de la aguja. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y los dispositivos pertenecen al I.M.P.A.S. (Grupo de Investigación en Medios Porosos y Aguas Subterráneas de la Universidad Nacional de Córdoba).

Se realiza la calibración del equipo con la norma, la cual presenta el procedimiento de cálculo que determina la conductividad térmica en suelos, rocas y otros materiales, estableciendo valores de conductividad térmica que luego se comparan con valores de conductividad de materiales con propiedades conocidas; en este caso, agua destilada, con un valor de 0.607 ± 0.03 W/m/K y glicerina líquida, con un valor de 0.292 ± 0.003 W/m/K.

Para un análisis cualitativo, se utilizó el método de termografía. La termografía activa, a diferencia de la termografía pasiva, se genera en búsqueda de respuestas diferenciadas entre los diversos materiales a evaluar, siendo en este caso suelo-cemento o rocas. Por tal motivo, se maximizan los procesos de calentamiento a través de una placa calefactora. Las cámaras termográficas son sensibles a radiación infrarroja y son capaces de medirla, permitiendo determinar la temperatura de las superficies que la irradian. Estas imágenes se muestran en una escala de colores variables que se puede elegir entre varias paletas, diseñadas para revelar de forma visual dichas temperaturas y hacerlas fácilmente entendibles. Esta tecnología también permite monitorear la difusividad térmica y el incremento de temperaturas en diversos materiales. En ciertas sustancias, el gran aumento de temperatura puede producir cambios de fase no deseados y descomponer la muestra (Flores y Lesino, 2004).

Para su ejecución, se utilizó una cámara marca TESTO modelo 871 (Tabla 1), con lente estándar FOV $35^\circ \times 26^\circ$ - IFOV 2,6 mrad, y pantalla TFT de 3.5" (Figura. La sensibilidad de una cámara se expresa en NETD (Noise Equivalent Temperature Difference), que representa la diferencia de temperatura entre dos puntos de la imagen que resulta en una señal igual al ruido aleatorio de *background* y se mide en °C. El campo de visión (FOV) es la región en el espacio que contiene

una cantidad específica de energía radiada que es recogida por el sistema óptico de un termómetro infrarrojo y se expresa normalmente en grados (Larsen y Hongn, 2012).

Tabla 1. Especificaciones de la cámara utilizada.

Cámara termográfica Testo 871	
Resolución IR	240 x 180 pixels
Campo de visión (FOV)	35° x 26° / 0.5m
Resolucion espacial (IFOV)	1.6 mrad
Sensibilidad térmica (NETD)	90mk
Frecuencia de imagen	9hz
Rango de temperatura	-30°C to +100°C; 0°C to +650°C
Exactitud	2 °C, ±2 % del valor medido



El propósito del ensayo termográfico activo es estudiar el comportamiento de las muestras bajo consideración, durante las etapas de calentamiento y enfriamiento. El ensayo se realizó sobre las 6 probetas de similares dimensiones en condiciones controladas de humedad y a temperatura ambiente, evitando la influencia de factores externos que pudieran alterar las fases de calentamiento y enfriamiento. En principio, los especímenes se calentaron artificialmente sobre una placa calefactora a 50°C, apoyando una de las caras planas de las probetas sobre la misma. Luego de un determinado tiempo, se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Durante ambas fases, se tomaron imágenes IRT con una frecuencia determinada.

3. Análisis de resultados

Secuencia de calentamiento en muestras de roca (Figura 3): durante la fase de calentamiento, la termografía secuencial muestra que la tasa de aumento de temperatura en el eje vertical de las probetas, desde su extremo inferior a superior es relativamente rápida. Así, para un lapso de tiempo $t = 60$ min, los extremos superiores de las muestras alcanzan temperaturas entre 30°C y 35°C.

La migmatita desarrolla mayores temperaturas en relación a las otras dos rocas analizadas. El estado de alteración avanzada de la muestra granítica, debería reflejarse en una menor tasa de calentamiento. Esto se ve parcialmente opacado por la rugosidad de su superficie, en relación a los otros dos testigos, de superficies más lisas y pulidas.

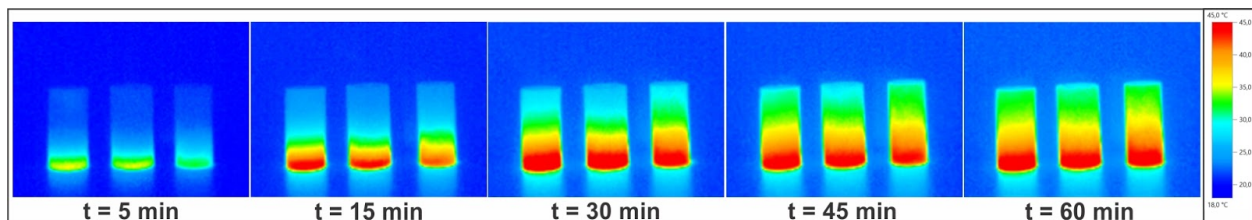


Figura 3. Secuencia de calentamiento de muestras de roca durante un lapso de 60 minutos. De izquierda a derecha: arenisca, granito y migmatita.

Secuencia de calentamiento en probetas de suelo-cemento (Figura 4): En este caso, la termografía de las probetas muestra una tasa de aumento gradual, en la que se puede apreciar que para el lapso de tiempo $t = 60$ min, los extremos superiores de las muestras alcanzan temperaturas entre los 25°C y 30°C .

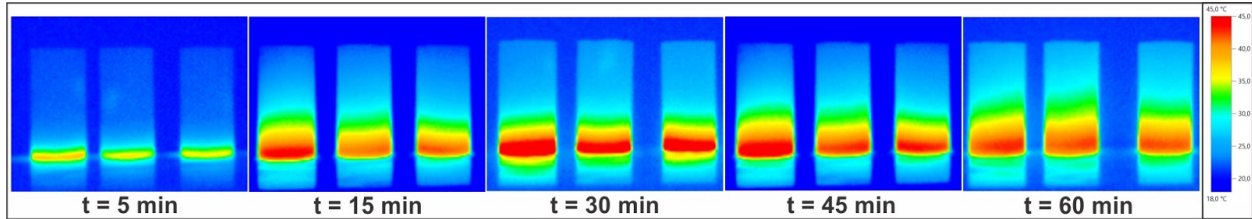


Figura 4. Secuencia de calentamiento de probetas de suelo-cemento durante un lapso de 60 minutos.

Secuencia de enfriamiento en muestras de roca (Figura 5): los termogramas obtenidos muestran que el enfriamiento de las probetas de roca ocurre de manera bastante uniforme, ya que luego de 30 minutos desde que se inició la fase de enfriamiento, las muestras ya habían homogeneizado su temperatura en todo el largo de la probeta, rondando los 30°C . Los bordes y extremos son las primeras porciones que se ven afectadas por la pérdida de calor. Las muestras alcanzan una temperatura levemente superior a la temperatura ambiente luego de transcurridos 90 minutos.

En el instante de enfriamiento $t = 0$ min, se puede apreciar que la migmatita alcanzó mayores temperaturas y uniformidad de la misma a lo largo de su eje mayor.

Posteriormente, aunque la variación de temperatura entre las muestras ocurre en un rango estrecho, es el granito el que mantiene una temperatura levemente más alta en la medida de que la fase de enfriamiento avanza.

Para el instante de tiempo $t = 120$ min, el mayor enfriamiento, aunque con una leve diferencia, se da en la migmatita (principalmente los bordes de la muestra comienzan a perder nitidez en relación a la temperatura ambiente).

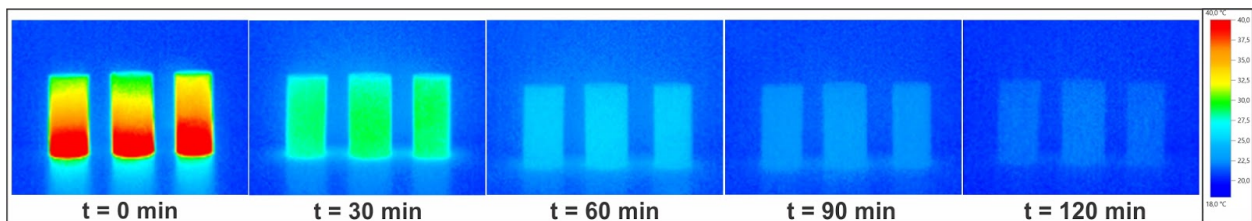


Figura 5. Secuencia de enfriamiento de muestras de roca durante un lapso de 120 minutos. De izquierda a derecha: arenisca, granito y migmatita.

Secuencia de enfriamiento en probetas de suelo-cemento (Figura 6): En las probetas de suelo-cemento, la termografía secuencial muestra que el enfriamiento de las mismas para el lapso de tiempo considerado no se uniformiza, y la amplitud del gradiente térmico, aunque se va disipando a lo largo del tiempo, permanece hasta después del minuto $t = 90$. La uniformidad de

las temperaturas de las probetas se observa en el tiempo $t = 120$ min. También puede observarse muy levemente un incremento en la temperatura reflejada de la probeta con mayor contenido de cemento.

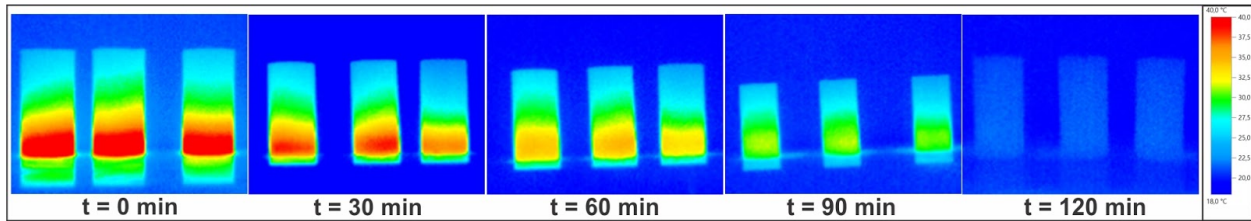


Figura 6. Secuencia de enfriamiento de probetas de suelo-cemento durante un lapso de 120 minutos.

En cuanto a los valores de conductividad térmica, es conocido que la conductividad térmica de las rocas puede variar hasta en un factor de dos para cualquier tipo de roca (Clauser, 1995). Esto se debe a la variación natural del contenido mineral de una roca, así como a varios factores físicos y diagenéticos.

Como referencia, se consideran las conductividades térmicas promedio de las rocas estudiadas, según Côté y Konrad (2005) (Tabla 2):

Tabla 2. Conductividades térmicas promedio de las rocas.

Probeta	Roca	Conductividad térmica λ_p (W/mK)
1	Arenisca	3,0
2	Granito	2,5
3	Migmatita*	3,0-5,0

Debido a la gran variedad composicional de la migmatita (*), no se refiere en la bibliografía existente a valores promedio o típicos. Para el caso, considerando su mineralogía (definida macroscópicamente), su nulo grado de alteración y muy baja permeabilidad, se estima un valor esperable entre un granito y una cuarcita.

Las conductividades térmicas medidas en las probetas de suelo-cemento a los 28 días de fraguado del cemento, se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Conductividades térmicas medidas en suelo-cemento.

Probeta	Cemento	Conductividad térmica λ (W/mK)
4	9%	0.325
5	6%	0.430
6	3%	0.489

En estas mediciones se conservó el mismo contenido de humedad en todas las probetas siendo de un 17% de humedad volumétrica, para lograr la máxima densidad seca en todas ellas.

4. Conclusiones

El análisis de la termografía comparativa en el proceso de calentamiento entre las muestras de suelo-cemento y roca denotan mayor incremento en la temperatura de las muestras de roca, determinando menor acumulación de calor en las muestras de suelo cemento para un periodo de tiempo comprendido entre los 5 y los 60 minutos de calentamiento sobre una placa calefactora a 50 °C.

Los termogramas adquiridos durante el enfriamiento natural de las muestras previamente calentadas, permitieron monitorear el comportamiento térmico de las mismas.

El análisis de los termogramas para los diferentes materiales, muestran un enfriamiento más paulatino de las probetas de suelo-cemento, y por lo tanto mayor inercia térmica, para el periodo comprendido entre el instante de tiempo 0 y hasta los 120 minutos de sometidas las muestras a enfriamiento natural.

Los valores de conductividad térmica son más significativos en las muestras de rocas, que en las muestras de suelo cemento, por lo que tendrán una mayor influencia en el dimensionado de los conductos para geotermia de baja entalpía. Por el contrario, las muestras de suelo cemento presenta una mayor inercia térmica para poder aprovechar el calor almacenado en el material. La termografía refleja, coherentemente con las mediciones de conductividad térmica, el incremento de temperatura en la probeta con mayor contenido de cemento.

5. Referencias

Artículos de revistas

- ASTM D-5334 (2007): Norma Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure
- Bidarmaghz, A., Makasis, N., Narsilio, G. A., Francisca, F. M., & Carro Pérez, M. E. (2016). Geothermal energy in loess. *Environmental Geotechnics*, 3(4), 225–236. <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00025>
- Carro Pérez; Agustina Peiretti; F.M. Francisca (2018). Energía geotérmica de baja entalpía en suelos loésicos: cálculo y diseño para caso de estudio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*. Vol. 22, pp 04.23-04.34, 2018. Impreso en la Argentina ISSN 2314-1433.
- Clauser, C., & Huenges, E. (1995). Thermal conductivity of rocks and minerals. *Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants*, 3, 105-126.
- Côté, J., & Konrad, J. M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 443-458.

- De Moel, M., Bach, P. M., Bouazza, A., Singh, R. M., & Sun, J. O. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2683-2696.
- Flores Larsen, S., Filippín, C., & Lesino, G. (2004). Monitoreo y simulación térmica de temperaturas superficiales de paredes. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8(5), 145-150.
- Förster, A., Förster, H. J., & Krentz, O. (2018). Exploration of the enhanced geothermal system (EGS) potential of crystalline rocks for district heating (Elbe Zone, Saxony, Germany). *International Journal of Earth Sciences*, 107(1), 89–101. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1429-6>
- Larsen, S. F., & Hongn, M. (2012). Termografía infrarroja en la edificación: aplicaciones cualitativas. *Av en Energías Renov y Medio Ambient*, 16, 25-32.
- Mosquera Arancibia, P. (2013). Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida (Doctoral dissertation, Arquitectura).
- Sigal, A., Cioccale, M., Rodríguez, C. R., Leiva E.P.M. (2015). Study of the natural resource and economic feasibility of the production and delivery of wind hydrogen in the province of Córdoba, Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 4413-4425.
- Toirac Corral, J. (2008). El suelo-cemento como material de construcción. *ciencia y sociedad*.
- Yari, M., & Javani, N. (2007). Performance assessment of a horizontal-coil geothermal heat pump. *International journal of energy research*, 31(3), 288-299.

Libros

- Brown, D. W., Duchane, D. V., Heiken, G., & Hriscu, V. T. (2012). Mining the earth's heat: hot dry rock geothermal energy. Springer Science & Business Media.

Memorias de congresos

- de La Bernardie, J., Bour, O., De Dreuzy, J. R., Guihéneuf, N., Chatton, E., Labasque, T., & Le Borgne, T. (2017). Characterization of shallow geothermal efficiency in fractured media through thermal tracer tests and numerical modeling. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 19, p. 9109).
- Brunat, L., y Escuer, J. (2010) Intercambiadores Tierra-Aire y Técnicas Emparentadas. Ejemplos Y Experiencias. II Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria.

Sobre los autores

- **Micaela Pleitavino:** Geóloga, estudiante de Doctorado en Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: micaelapleitavino@gmail.com

- **Belén Costantini:** Arquitecta, estudiante de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Nacional de Córdoba. Profesor Asistente de la FCEFYN. E-mail: belen.costantini@unc.edu.ar
- **Magalí Carro Pérez.** Ingeniera Civil. Magister en Recursos Hídricos y Doctora en Ciencias de la Ingeniería. Profesora titular del Departamento de Construcciones Civiles de la FCEFYN. Investigadora Asistente de CONICET y del IDIT - UNC. E-mail: mcarroperez@unc.edu.ar

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)