



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

RETOS EN LA FORMACIÓN  
DE INGENIEROS EN LA  
ERA DIGITAL



# GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOÉSSICOS: EFICIENCIA, CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y CONFIGURACIONES

**Magalí E. Carro Pérez**

**Universidad Nacional de Córdoba  
Córdoba, Argentina**

## Resumen

La crisis ambiental y energética es un tema recurrente en la política global a nivel mundial y en Latinoamérica. El crecimiento poblacional y las exigencias de confort conllevan a actuar sobre las construcciones civiles a través de nuevos sistemas alternativos de usos de energía renovable que constituye un desafío para lograr un uso más racional de la energía. La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie del terreno. En función del rango de temperaturas presente en el subsuelo, se pueden clasificar en energía geotérmica de muy baja, baja, media y alta entalpía. La energía geotérmica de muy baja entalpía es la que se puede aprovechar para la climatización de construcciones mediante el empleo de bombas de calor geotérmicas. Este tipo de sistemas energéticos ha despertado el interés de numerosos investigadores alrededor del mundo en estos últimos años. Sin embargo, los intentos de aprovechar el sistema de energía de baja entalpía son aún escasos. Los sistemas de climatización a partir de geotermia de baja entalpía en viviendas están muy desarrollados en el norte de EE.UU., Canadá, Japón, Austria, Suiza, Grecia, Australia y Europa, pero existen pocos antecedentes en Latinoamérica. En este trabajo se plantea el importante desafío de estudiar sistemas alternativos de tecnologías de construcción que puedan aprovechar la energía geotérmica y que puedan ser aplicados en suelos loésicos. Se presentan aquí las características de los suelos loésicos, el análisis de la conductividad térmica y cómo influye ésta en los sistemas geotérmicos de baja entalpía.

**Palabras clave:** loess; propiedades térmicas; eficiencia energética

## Abstract

*The environmental and energy crisis is a recurring theme in global politics worldwide and in Latin America. The population growth and the demands of comfort involve an act on civil constructions through new alternative systems of renewable energy uses that offer a challenge to achieve a more rational use of energy. Geothermal energy is energy stored in the form of heat below the surface of the ground. Depending on the range of temperatures present in the subsoil, they can be classified into geothermal energy of very low, low, medium and high enthalpy. The geothermal energy of very low enthalpy is the one that can be used for the air conditioning of the constructions by means of the use of geothermal heat pumps. This type of energy systems has aroused the interest of many in the world in recent years. However, attempts to take advantage of the low energy system are even more scarce. HVAC systems based on low enthalpy geothermal energy in homes are very good in the northern US, Canada, Japan, Austria, Switzerland, Greece, Australia and Europe, but there are few antecedents in Latin America. This work solves the problem of alternative systems of construction technologies that can take advantage of geothermal energy and that have been applied in the loess soils. The characteristics of the loess soil, the analysis of the thermal conductivity and how to influence the low enthalpy geothermal systems are presented here.*

**Keywords:** *loess; thermal properties; energy efficiency*

## 1. Introducción

El consumo de energía se encuentra muy relacionado con la calidad de vida. La crisis energética y los problemas ambientales que ésta acarrea son motivos recurrentes de preocupación a nivel mundial (Santamarina y Cho, 2011). En nuestro país, en las últimas décadas se ha observado un crecimiento del consumo de energía eléctrica tanto para uso comercial como residencial como consecuencia de las actividades económicas, el crecimiento poblacional y el aumento de las exigencias de confort (Ferrari y Frezzi, 2013). Particularmente, del gasto total de energía en Argentina, un 35% se emplea para el uso y funcionamiento de edificios, superando al gasto en la industria y actividades agropecuarias (34%) y en transporte (31%). Es decir que las actividades en viviendas y edificios públicos son responsables de un poco más de un tercio del consumo total de la matriz energética de la República Argentina (Secretaría de Energía de la Nación, 2010). Sumado a ello, sólo el 1% del total proviene de fuentes renovables lo cual en la actualidad representa un desafío importante para revertir esta situación. Entre las energías renovables o que no contaminan ni en su modo de obtención ni emiten subproductos que puedan incidir negativamente en el medio ambiente se encuentran la eólica, biomasa, solar y geotérmica, entre otras (Yun et al., 2011). Todas ellas presentan ventajas y desventajas y algún tipo de impacto ambiental, ya sea visual, ecológico, en su extracción, en el arrastre de minerales, etc. Aun así, son preferidas en relación a las no renovables por su disponibilidad, porque no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones. Contrariamente a lo que ocurre con los combustibles, sean fósiles o renovables, las energías renovables no emiten dióxido de carbono adicional, salvo los necesarios para su construcción y funcionamiento, y no presentan riesgo suplementario, tales como el riesgo nuclear. Es indiscutible que en un modelo de crecimiento se debe recurrir a la

eficiencia energética para poder obtener los mismos niveles de desarrollo y confort, pero con un menor consumo de energía para garantizar la sustentabilidad de la economía a largo plazo. Dentro de varios desafíos para lograr un modelo sostenible se encuentran los de aplanar la curva de demanda y fomentar la generación de recursos renovables (Ferrari y Frezzi, 2013). En este aspecto, las energías renovables deben ser consideradas como una fuente alternativa para resolver el problema de la demanda creciente de energía, tanto en nuestro país como a nivel global. Actuar sobre las construcciones civiles a través de nuevos sistemas alternativos de usos de energía renovable, también llamadas limpias o verdes, constituye un desafío para lograr un uso más racional de la energía. Son variadas las investigaciones realizadas sobre las características de la envolvente de un edificio tendiente a determinar la influencia de la misma en el aumento o disminución de los costos de energía relacionada con la climatización (Czajkowski, 2000; Salvetti et al., 2009). En general, las normas de eficiencia energética, hacen hincapié en el control de la envolvente como forma de regulación del consumo (IRAM, 2004). No obstante, para la determinación de la eficiencia energética de un edificio, son también relevantes el diseño de las instalaciones, la elección de los materiales, la tecnología y la modalidad de uso y mantenimiento. Resulta interesante que a pesar de la gran variedad de tipos de climas de la Argentina, se ha unificado la tipología de construcción sin analizar el ciclo de vida y sin atender a la baja eficiencia energética que tienen las mismas, aplicando similares respuestas constructivas en diferentes latitudes y altitudes. Esta política es una gravosa carga para el consumo energético, ya que se destina una gran cantidad de recursos no renovables para lograr por medios artificiales las condiciones de confort adecuadas. Frente a este panorama, la energía geotérmica ha despertado el interés de numerosos investigadores alrededor del mundo en estos últimos años (Adaro et al., 1999; Sanner, 2001; Lund et al.; 2005; Fu et al., 2013; Hähnlein et al. 2013).

## **2. Geotermia de Baja Entalpía**

El Consejo Europeo de la Energía Geotérmica (EGEC) define a la energía geotérmica como la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie del terreno. Se considera el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera sea su temperatura, profundidad o procedencia. En función de la temperatura o más exactamente, de la entalpía presente en el subsuelo, se pueden clasificar en energía geotérmica de muy baja, baja, media y alta entalpía (Xydis et al., 2013). La energía geotérmica superficial o de muy baja entalpía es la que se puede aprovechar para la climatización de construcciones mediante el empleo de bombas de calor geotérmicas (Fu et al., 2013). La tierra tiene una gran inercia térmica y capacidad de almacenar calor y mantenerlo estacionalmente. Al mismo tiempo, las cimentaciones de construcciones civiles, como por ejemplo plateas o pilotes, pueden ser utilizados como sistemas de almacenamiento de calor (Suckling y Cannon 2004).

El intercambio geotérmico se realiza mediante un circuito cerrado instalado en conducciones que se instalan de manera vertical u horizontal en el terreno junto al edificio o vivienda. El flujo de calor se favorece mediante la circulación de fluidos utilizando una bomba de calor y el sistema de conducción que funciona como un intercambiador de calor (Sanner, 2001; Brandl, 2006, Johnston et al. 2011). En todo momento se busca mantener una temperatura confortable en el interior de las construcciones, aunque en el verano el aire exterior se encuentre a elevadas

temperaturas y en invierno en el exterior las temperaturas del aire sean inferiores a la de confort. Mediante los sistemas de aprovechamiento de energía geotérmica superficial se produce un intercambio de calor entre el fluido que circula y la tierra, de manera directa o a través de las cimentaciones. En invierno la tierra transfiere al fluido el calor que almacena el cual se utiliza para calefacción mediante la circulación del fluido mediante una bomba de calor. En verano, el agua transfiere al terreno el exceso de calor del edificio de forma de obtener refrigeración (Brandl, 1998). Una alternativa de reciente desarrollo consiste en aprovechar la energía geotérmica a través de las fundaciones y elementos de hormigón en contacto con el suelo, los cuales se requieren por razones estructurales, pero que simultáneamente pueden trabajar como intercambiadores de calor (Suckling y Cannon, 2004; Brandl, 2006). Entre las experiencias exitosas en otras partes del mundo se encuentran la utilización de estructuras convencionales (pilotes, muros pantalla, etc.) donde se instalan tubos rellenos con un fluido transportador de calor que conforman el principal circuito del sistema de energía geotérmica. De esta manera se aprovecha el hormigón que tiene una conductividad térmica más alta que el suelo y una alta capacidad de almacenamiento térmico. La transferencia de calor desde o hacia el suelo que rodea al fluido portador de calor se realiza a través de los tubos absorbentes y material que rodea al mismo (e.g. relleno de una perforación, agua subterránea, hormigón del pilote). Tanto en el caso de las perforaciones verticales u horizontales utilizadas para aprovechar la energía almacenada, como en los sistemas insertados en las cimentaciones de estructuras, el sistema es de tipo cerrado (Brandl, 2006). Los mecanismos de transferencia de calor que se desarrollan en el suelo son múltiples y complejos, e involucran (a) conducción, (b) convección, (c) radiación, y (d) calor latente o asociado a los cambios de estado de la materia, siendo los dos primeros los principales en el caso de suelos no congelados (Rees et al., 1999).

El fenómeno de convección viene representado por la ecuación (1), donde  $q_{conv}$  representa el calor transferido por convección,  $c$  es el calor específico del fluido utilizado para la transferencia,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v$  es la velocidad media del flujo del líquido,  $T$  es la temperatura final y  $T'$  es una temperatura de referencia.

$$q_{conv} = c\rho_f\bar{v}(T - T') \quad (1)$$

Por su parte, el calor transferido por conducción ( $q_{cond}$ ) depende de la conductividad térmica  $\lambda$  y el gradiente de temperaturas en la dirección de flujo  $\partial T/\partial n$ , y puede calcularse como:

$$q_{conv} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

La solución de la ecuación diferencial de flujo de calor por conducción en suelos depende de las condiciones de borde, geometría, propiedades y homogeneidad del medio, presencia de fuentes de calor, etc. (Porta et al., 2003; Mitchel y Soga, 2005).

El uso de la geotermia y sus avances se observan en diferentes y creciente número de países en el mundo (Yari y Javani, 2007; de Moel et al., 2010). Los distintos métodos de aprovechamiento geotérmico, dependen tanto de la geometría como del material constitutivo de las perforaciones que alojan las tuberías para la recirculación de fluidos (Hähnlein et al., 2013). Se ha estudiado el uso de mezclas mejoradas térmicamente para aumentar la conductividad alrededor de los tubos conductores de calor (Hepbasli, 2002; Esen 2009). Adicionalmente, los tubos en donde se

realiza el intercambio térmico permiten modificaciones en la configuración y disposición (Brandl, 2006). Los tubos o cañerías que últimamente se están utilizando son de polietileno de alta densidad (HDPE), aunque en otras oportunidades se ha utilizado policloruro de vinilo (PVC). La eficiencia general del sistema estará dado por la configuración los mismos (U, sobre U, triple U o W) (Florides y Kalogirou, 2007; Gao, 2008; Sanaye y Niroomand, 2009). Los sistemas de climatización a partir de geotermia de baja entalpía en viviendas están muy desarrollados en el norte de EE.UU., Canadá, Japón, Austria, Suiza, Grecia, Australia y Europa (Maghiar y Antal, 2001; Brandl, 2006; de Moel et al., 2010; Xydis et al., 2013) pero existen escasos antecedentes en nuestro país (Iannelli y Gill, 2012).

### **3. Principales características de los suelos loésicos**

El loess es un sedimento cuaternario compuesto principalmente de partículas finas que forman una microestructura abierta. Este suelo se caracteriza por una estructura interna que controla el comportamiento termo- hidro-mecánico de las formaciones loessicas, es un suelo inestable que desarrolla colapso por aumento de la humedad o aumento de la presión. Esto produce importantes asentamientos que afectan la infraestructura civil y estructuras que sufren importantes distorsiones (Rocca et al., 2006). Los suelos loessicos cubren aproximadamente el 10% de los continentes, incluidos América del Norte, Europa, Asia y América del Sur (Rinaldi et al., 2007). Las formaciones de loess más significativas se encuentran en Argentina (Iriondo, 1997; Zárate, 2003), la República Checa (Marschalko et al., 2013), China (Kuklay An, 1989), Rusia (Little et al., 2002), España (Günster et al., 2001) y los Estados Unidos (Leighton y Willman, 1950).

En la Argentina los depósitos cuaternarios de sedimento loésico, conocido como loess pampeano, cubren 600.000 km<sup>2</sup> del noreste del país. Arena muy fina, limo y partículas de arcilla transportados por el viento son las principales fracciones de estos sedimentos (Sayago et al., 2001; Francisca, 2007). Los espesores de estos sedimentos loésicos generalmente van desde pocos metros hasta un máximo de 65 m (Teruggi, 1957).

La Tabla 1 muestra las principales propiedades físicas del loess de Argentina, de acuerdo con Teruggi (1957), Francisca et al. (2002), Rocca et al. (2006), Francisca (2007) y Narsilio et al. (2015) Normalmente, la fracción limosa prevalece sobre las fracciones de arcilla y arena. Hay un alto contenido de vidrio volcánico en las fracciones de arena y limo de los sedimentos en esta región. Además, los principales minerales encontrados comprenden el cuarzo, feldespato y biotita y otros de menor importancia en fracciones menores al 1% (Quintana Crespo, 2005). En los sedimentos loésicos de Córdoba, la fracción arcilla contiene principalmente illita (Kröhling, 1999; Iriondo y Kröhling, 1996; Zárate, 2003).

Tabla 2.1. Principales propiedades físicas del Loess Pampeano en Argentina (datos compilados de Teruggi, 1957; Francisca et al., 2002; Rocca et al., 2006; Francisca, 2007; Narsilio et al. 2015)

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor típico</b>
Peso unitario seco	kN/m <sup>3</sup>	12,2 – 14,5
Peso unitario húmedo	kN/m <sup>3</sup>	14,9 – 16,8
Límite líquido (LL)	%	20,8 – 32,2
Índice plástico (PI)	%	0 – 8,0
Fracción arena	%	5 – 15
Fracción limosa	%	40 – 75
Fracción arcilla	%	7 – 25
Vidrio Volcánico (en fracción arena y limo)	%	6 – 50,5
pH ( en un relación de agua/partícula de suelo de 2,5)	-	8,5 – 9,63
Color	-	Castaño claro
Conductividad térmica	W/(m K)	0,36–0,88

De las características antes mencionadas, para la aplicación de geotermia de baja entalpía los factores más importantes es la magnitud de la conductividad térmica y los cambios volumétricos posibles de ocurrir en caso de colapso por humedecimiento.

#### **4. Aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía**

En cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo, a pocos metros de profundidad para la climatización de casa individuales y edificios. La energía geotérmica de baja entalpía basa sus aplicaciones en la capacidad que posee el subsuelo de acumular calor y de mantener una temperatura sensiblemente constante a lo largo de todo el año (dicha temperatura rondará los 15° C variando en función de la zona considerada), a una profundidad menor, la temperatura se ve afectada por el clima exterior. La instalación geotérmica de baja temperatura y poca profundidad capaz de aprovechar las temperaturas estables de la capa superficial del subsuelo para proporcionar a las viviendas aire fresco en verano y más caliente en invierno. Esta técnica, conocida también como pozos canadienses o provenzal, consiste en enterrar unos conductos a una profundidad entre 1,5 m y 5 metros en el subsuelo y hacer circular por ellos aire. Este aire, en contacto con las tuberías, adquiere la temperatura del subsuelo, ya sea ésta mayor o menor a la externa y luego se hace circular, con o sin aporte térmico adicional, por el interior de la vivienda (Peiretti, 2017). Se han llegado a determinar tres tipos diferentes de configuración de sistemas de tubos enterrados: tipo bloque Techelmann (bloque – rejilla), distribución Techelmann (rejilla) y directos aislados (anillo). Estos tipos de distribución varían entre sí por el número y la distribución de los de los tubos horizontales (Rehau, 2012).

## 5. Cálculos

Tzaferis y otros (1992) estudiaron varios modelos de cálculos para intercambiadores de calor tierra-aire. Se calcula la transferencia de calor desde el aire de circulación a la tubería y luego calcula la transferencia de calor de la tubería al suelo. Los datos de entrada necesarios son: las características geométricas del sistema, las características térmicas de la tubería y del suelo, la temperatura del suelo durante el funcionamiento del sistema (Paepe y Janssens, 2002). La resolución de la mayoría de los métodos citados es compleja y su resolución se hace por medio de herramientas matemáticas o modelos computacionales de elementos o diferencias finitas donde se simulan numéricamente los fenómenos de transmisión de calor.

Por ejemplo, el cálculo por el Método de la efectividad NTU, se basa en la determinación de dos números adimensionales  $\epsilon$  (eficiencia) y NTU (número de unidades de transferencia), los cuales se relacionan; en este caso aplicado a un intercambiador de calor aire-suelo desarrollado por Paepe y Janssens. Este método permite obtener las temperaturas del aire a la salida del sistema, conociendo la temperatura de entrada del aire y su velocidad, además de establecer antes del cálculo, las dimensiones y longitud de los caños. Carro Pérez y colaboradores (2018) han realizado cálculos con este método para casos de estudio en loess.

En el caso de simulaciones por diferencias finitas para sistemas de geotermia en loess lo ha realizado Bidarmaghz y sus colaboradores (2016).

## 6. Conclusiones

Se realiza una apretada síntesis del contexto general por el cual es necesario buscar nuevas fuentes de energía o sistemas que colaboren al ahorro energético. Se presentan la revisión de los autores que trabajan con sistemas de geotermia de baja entalpía, las configuraciones y métodos de cálculo. Dentro de las características más importantes de los suelos loéssicos se destaca el valor de conductividad térmica que es el parámetro del suelo que mayor influencia tendrá en el cálculo del sistema.

## 7. Referencias

### Artículos de revistas

- Adaro, J.A., Galimberti, P.D., Lema, A.I., Fasulo, A., Barral, J.R. (1999). Geothermal contribution to greenhouse heating Applied Energy. 64 (1-4):241-249.
- 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>
- Brandl H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique 56(2):81–122.

- Brandl, H. (1998). Energy piles for heating and cooling of buildings. Proc. 7th Int. Conf. Exhib. Piling and Deep Foundations, Vienna, 3.4.1–3.4.6.
- 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.
- Czajkowski J.D. (2000). Desarrollo de un modelo de ahorro de energía en edificios de vivienda y Determinación de valores límite de calidad térmica para la República Argentina. Revista Avances en Energías Renovables y Ambiente 4(2):39-42.
- De Paepe, M., & Janssens, A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and buildings*, 35(4), 389-397.
- Esen H, Inalli M. (2009). In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazlg, Turkey. *Energy and Buildings*;41(4):395–401.
- Ferrari C. y Frezzi P. (2013). Modelo de crecimiento del sistema eléctrico de la provincia de Córdoba Período 2010-2040 en Matriz de recursos energéticos de la Provincia de Córdoba. Ed.Devalis.
- Florides G, Kalogirou S. Ground heat exchangers—a review of systems, models and applications. *Renewable Energy* ;32(15):2461–78.
- Francisca, F. M. (2007). "Evaluating the constrained modulus and collapsibility of loess from standard penetration test". *ASCE International Journal of Geomechanics*, 4 (4), 307-310.
- Francisca, F. M., Redolfi, E. R., y Prato, C. A. (2002). "Análisis de tuberías enterradas en suelos loésicos: efecto de la saturación del suelo". *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 2 (2), 3-19.
- Fu Y., Zhang C.Y., Zhang B. (2013). Benefits Analysis and Utilization Strategy for Development of Shallow Geothermal Energy: A Case Study of Tianjin. *Advanced Materials Research*. 616-618: 1640-1646.
- Gao J. (2008). Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application. *Applied Energy*85(10):901–10.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., Blum, P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy, *Energy Policy*; 59: 914-925
- Hepbasli A. (2002). Performance evaluation of a vertical ground-source heat pump system in Izmir, Turkey. *International Journal of Energy Research* 26(13):1121–39.
- Iannelli L., Gil S. (2012). Acondicionamiento térmico de aire usando energía geotérmica-ondas de calor Lat. Am. J. Phys. Educ. 6(1):99-105
- IRAM, Instituto Argentino de Normalización (2004). Normas IRAM Serie 11.000. Norma 11659-1 - Aislamiento térmico de edificios. IRAM 11601/96: Acondicionamiento térmico de edificios. IRAM 11603/96: Zonas Bioambientales de la Republica Argentina. IRAM 11604 / 2001 Aislamiento Térmico de Edificios. IRAM 11605/96: Acondicionamiento Térmico de Edificios. Norma IRAM 11900/2010: Etiqueta de eficiencia energética de calefacción para edificios [www.iram.org.ar](http://www.iram.org.ar)
- Iriondo, M. y Kröhling ,D. (1996). "Los sedimentos eólicos del noreste de la llanura pampeana (Cuaternario superior)". XIII Congreso Geológico Argentino; Actas IV:27-48. Bs. As.



- Johnston I.W., Narsilio G.A., Colls S. (2011). Emerging geothermal energy technologies". *KSCE Journal of Civil Engineering* 15(4):643-653.
- Kröhling, D. M. (1999). "Sedimentological maps of the typical loessic units in North Pampa Argentina". *Quaternary International*, 62 (1), 49-55.
- Lund J. W., Freeston D. H. y Boyd T. L. (2005). Direct Application of Geothermal Energy: 2005 Worldwide Review," *Geothermics*, 34(6):691-727. doi:10.1016/j.geothermics.2005.09.003
- Maghiar T. y Antal C. (2001). "Power generation from low-enthalpy geothermal resources". *GHC Bulletin* 2001, p. 35-37.
- Moel M., Bach P.M., Bouazza A., Singh R.M., Sun J.L.O (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renew Sust Energy Rev.* 14:2683–2696.
- Narsilio G, Francisca F, Ferrero H et al. (2015) Geothermal energy in loess: a detailed numerical case study for Cordoba. XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Buenos Aires, Argentina.
- Peiretti, A. S. (2017). *Geotermia de baja entalpia en suelos Loessicos; casos de estudio* (Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.).
- Porta, J.; López Acevedo, M. y Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio Ambiente*. 3ra Edición. Mundi Prensa. Madrid.
- Quintana Crespo, E. (2005). "Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos". Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba.
- Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M. y Thomas, H. R. (2000). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy*. 4(3):213–265
- Rocca, R. J., Redolfi, E. R. y Terzariol R.E. (2006). "Características geotécnicas de los loess de Argentina". *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6 (2), 3-19.
- Salvetti B., Czajkowski J., Gómez A. (2009). Análisis del comportamiento energético-ambiental en torre de viviendas en La Plata. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 13(5)127-134.
- Sanaye S, Niroomand B. (2009). Thermal-economic modeling and optimization of vertical ground-coupled heat pump. *Energy Conversion and Management*.50(4):1136–47.
- Sanner B. (2001). *Shallow Geothermal Energy. Lecture Notes: International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy*. Division of Earth Science, Stanford University, 21 pp.
- Santamarina, J. C. y Cho and G-C. (2011). Energy geotechnology. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 15(4):607- 610.
- Secretaría de Energía de la Nación. (2010). Balance Energético de la Nación 2010. <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3366>
- Suckling, T. y Cannon, R. (2004). Energy piles for Pallant House, Chichester, UK. *Ground Engng*. 37(7): 27–29.
- Teruggi, M. E. (1957). "The nature and Origin of Argentinean Loess". *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 323-332.

- Tricart, J. (1969). "Actions éoliennes dans la Pampa Deprimida". *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 4, 178–189.
- Tzaferis, A., Liparakis, D., Santamouris, M., Argiriou, A., (1992). "Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers." *Energy and Buildings*, 18 (1992): 35-43.
- Xydis G.A., Nanaki E.A., Koroneos C.J. (2013). "Low-enthalpy geothermal resources for electricity production: A demand-side management study for intelligent communities". *Energy Policy* 62, p. 118–123.
- Yari M, Javani N. (2007). Performance assessment of a horizontal-coil geothermal heat pump. *International Journal of Energy Research*.31(3): 288–99.
- Yun TS, Lee J-S, Lee S-C, Kim Y-J, Yoon J-K (2011). Geotechnical issues related to renewable energy. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 15(4):635-642
- Zarate, M. A. (2003). "Loess of southern South America". *Quaternary Science Reviews*, 22 (18-19), 1987–2006.

### **Sobre la autora**

- **Magalí Carro Pérez.** Ingeniera Civil. Magister en Recursos Hídricos. Doctora en Ciencias de la Ingeniería. Profesora titular del Departamento de Construcciones Civiles de la FCEfyN- UNC. Investigadora Asistente de CONICET y del IDIT - UNC. E-mail: [mcarroperez@unc.edu.ar](mailto: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)