





POTENCIAL DE ENFRIAMIENTO GEOTÉRMICO PARA EDIFICACIONES EN ZONA ÁRIDA

Recibido 14/08/2019
Aceptado 12/11/2019

THE GEOTHERMAL COOLING POTENTIAL FOR BUILDINGS IN ARID ZONES

MARIO CÚNSULO

Ingeniero Civil, Docente adjunto e Investigador
Universidad Nacional de San Juan - Instituto de Estudios
en Arquitectura Ambiental INEAA -Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
<https://orcid.org/0000-0001-7981-6683>
mcunsulo@unsj.edu.ar

SANTIAGO TOSETTI

Doctor en Ingeniería
Investigador Instituto de Automática (INAUT)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET) - Universidad Nacional de San Juan Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-9255-5422>
stosetti@gmail.com

ALEJANDRA KURBÁN

Doctora en Arquitectura y Urbanismo
Docente titular Facultad de Arquitectura
Universidad Nacional de San Juan - Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
<https://orcid.org/0000-0002-8795-1129>
akurban@unsj.edu.ar

EDUARDO MONTILLA

Arquitecto
Docente Titular Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño
Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-7814-5734>
alejo_montilla@yahoo.com.ar

RESUMEN

En el presente artículo se analiza cuantitativamente el potencial geotérmico para ser usado como sistema pasivo de refrescamiento edilicio en un ambiente árido urbano, tomando como caso de estudio el Área Metropolitana de San Juan (República Argentina). Se utiliza como insumo la base de datos climáticos y meteorológicos correspondiente a la estación verano, obtenida en el Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM) de la Universidad Nacional de San Juan, lugar donde el Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental "Arq. Alberto Papparelli" (INEAA) registra: temperatura del suelo, a distintas profundidades, y parámetros meteorológicos ambientales. Los resultados están relacionados con la identificación de gradientes y profundidades óptimas para el aprovechamiento del recurso como Sistema Pasivo de Refrescamiento Geotérmico, a fin de proveer condiciones de confort higrotérmico en zonas urbanas áridas durante el verano. En promedio, se obtiene una diferencia máxima de 8,7°C entre la temperatura del aire y la de la tierra, a una profundidad de 3m. La longitud de los conductos enterrados necesaria resulta de 64m para una velocidad del aire de 3m/s, la cual se reduce a 27m para una velocidad de aire de 2m/s.

Palabras clave

arquitectura bioclimática, sistemas pasivos, ahorro energético.

ABSTRACT

In this article geothermal potential is quantitatively studied to be used as a passive building cooling system in an arid urban environment. The San Juan Metropolitan Area, Argentina is taken as a case study. A climate and weather database for the summer season was used as input. It was generated at the National University of San Juan's Islas Malvinas University Complex (CUIM), where the Arq. Alberto Papparelli Institute for Studies in Environmental Architecture (INEAA) records data on soil temperature at different depths and meteorological parameters in the environment. The results identify gradients and optimal depths to use this resource as a passive geothermal cooling system in order to provide hygrothermal comfort in arid urban zones during the summer. There was an average maximum difference of 8.7 °C between the air temperature and the ground temperature at a depth of 3m. The required length of the buried tubes is 64m for an air speed of 3 m/sec, which decreases to 27m for an air speed of 2m/s.

Keywords

bioclimatic architecture, passive systems, energy savings

INTRODUCCIÓN

Los sistemas pasivos de acondicionamiento térmico de viviendas se presentan como una alternativa válida para lograr el confort higrotérmico, en particular para aquellas personas que no pueden acceder al uso de sistemas que utilizan energías convencionales, por su elevado costo. El ahorro energético que se obtendría con la implementación del concepto de arquitectura sustentable concretamente en la planificación y ejecución de viviendas sociales produciría un gran impacto en la demanda de la matriz energética local, ya que se podría usar este ahorro energético en actividades de producción. Al mismo tiempo, se consigue, mediante esta perspectiva, una reducción de las peligrosas emisiones de CO₂ a la atmósfera (Kurbán, Cúnsulo, Álvarez, Montilla y Ortega, 2015).

La provincia de San Juan, se encuentra localizada en el centro-oeste de la República Argentina (latitud sur 31°32'; longitud oeste 69° 31'), en la diagonal árida Sudamericana. El Área Metropolitana de San Juan (AMSJ), ubicada al suroeste de la provincia; presenta un clima urbano árido (índice Thornthwaite = 0.0794) y continental (Gorczynsky [K]= 34.12). Posee elevadas amplitudes térmicas, tanto diarias como estacionales y anuales (17,3°C), bajos tenores de humedad (promedio anual = 40,92%), régimen estival de escasas precipitaciones (anual = 77,72mm), una elevada radiación solar en todo el año (490W/m²), como consecuencia de una nubosidad cada más reducida, y un déficit de agua de 979,28mm. Durante todo el año el viento más frecuente es del sector sur (promedio 7km/h), con ráfagas intensas asociadas a tempestades de polvo, en ocasiones, propias de un cambio de tiempo. En efecto, previo a los cambios de tiempo suele aparecer un viento local denominado "zonda", que constituye un efecto *föhn*, caracterizado por aire muy deshidratado y tórrido que puede durar desde unas horas hasta varios días (Kurbán et al., 2015).

En suma, la zona de estudio posee recursos que pueden aprovecharse para dar respuestas de confort higrotérmico a la población, al tiempo que comporta una estrategia altamente sustentable al incidir directamente en el ahorro energético y, con ello, en la disminución de la contaminación ambiental (Kurbán et al., 2015; Cabezas, 2013). Siempre que se diseñen sistemas de acondicionamiento térmico de edificios es muy importante que se valide su eficiencia a través de programas de simulación con el propósito de evaluar la pertinencia de su aplicación (Flores Larsen y Lesino, 2001).

Los insumos básicos de diseño de la mayoría de los sistemas pasivos son los registros de temperatura, radiación solar, humedad relativa y vientos; usualmente difíciles de conseguir para áreas urbanas. De ahí la importancia del banco de datos meteorológicos urbanos obtenidos en el INEAA, el cual cuenta con 20 años de registros continuados, lo que permite realizar estudios con datos certeros y confiables.

El uso de sistemas pasivos y/o híbridos para acondicionar el aire que ingresa a los edificios ha ganado creciente aceptación

en los últimos años debido al ahorro económico que se logra en los requerimientos energéticos necesarios para acondicionarlos térmicamente (Flores Larsen, Hernández, Lesino y Salvo, 2001; Bansal, Misra, Agrawal y Mathur, 2010).

No ocurre lo mismo cuando el sistema pasivo es el refrescamiento geotérmico. En San Juan, previo a la realización del proyecto que dio origen al presente artículo, no se contaba con registros de temperatura ni humedad del suelo con objetivos de aprovechamiento pasivo geotérmico. Para realizar algún tipo de estimación del recurso, se recurría a datos extraídos de otras regiones con características climáticas y edáficas generalmente diferentes a esta zona. Esta escasez de datos hacía poco confiables las posibles aplicaciones de una estrategia empleada en otras latitudes con buenos resultados bioclimáticos. Las condiciones de aridez intervienen de manera directa en las propiedades termofísicas de la tierra, por lo que no es válido simplemente extrapolar las aplicaciones a otros ambientes urbanos de contextos geográficos diferentes.

La Tierra se comporta como un gran colector y acumulador de energía. El suelo ostenta muchas propiedades térmicas potencialmente valiosas debido a su alta capacidad calorífica y gran inercia térmica. Con una densidad media de 1800-2500kg/m³, posee un calor específico de 920J/kg°K y una conductividad térmica media de 0.3W/m°K (comparada con 0.58W/m°K para el agua y 380W/m°K para el cobre). La capacidad térmica volumétrica del suelo es de alrededor de 2MJ/m³°K comparada con 4.5MJ/m³°K del agua (Iannelli y Gil, 2012). Por otra parte, su baja conductividad térmica hace que la penetración del calor en el suelo sea muy lenta, al igual que su enfriamiento (Xamán et al., 2014, Ahmed, Ip, Miller y Gidado, 2009).

Las propiedades térmicas del suelo hacen que las variaciones diurnas de la temperatura no penetren más allá de 0,5m, pero las variaciones anuales de temperatura, llegan hasta una profundidad de unos 4m. Más allá de estas profundidades, la temperatura de la tierra se mantiene constante todo el año (Iannelli et al., 2013).

La sistematización del aprovechamiento geotérmico puede realizarse utilizando el fluido aire para la transferencia térmica. En ese caso, se emplean tubos enterrados cuya función es la climatización estival o invernal del aire de ventilación. El sistema consiste en hacer circular aire desde el exterior al interior del edificio a través de conductos bajo tierra, que son los que permiten el intercambio de calor (Vidal y Vidal, 2011, Bisoniya T. 2015, Tiwari, Singh, Joshi, Shyam y Prabhakant, 2014).

Según Hollmuller y Lachal (2005), la temperatura interior que se obtiene aprovechando el potencial geotérmico es de 15°C en cualquier parte del mundo, de día o de noche, en invierno o en verano, pero estos autores no especifican la profundidad de la tubería.

Un estudio realizado en Asunción (Cohenca, Bordas y Schwartzman, 2013) indica que, a una profundidad del orden de 3,5m, se produce una estabilización de la temperatura del suelo en torno de los 23,5°C. En verano, la temperatura media ambiental es de 28,4°C siendo ésta apreciablemente superior a la media del suelo.

Investigaciones realizadas en Kusuda (EE.UU.) en 1965 determinaron que la temperatura a una profundidad mayor a 2m ya no presenta variabilidad y corresponde a la media de la temperatura anual (Baver, Gardner y Gardner, 1991).

En climas cálidos, la temperatura del suelo en verano es más fría que la temperatura exterior nocturna, pero aún muy cálida para producir un enfriamiento efectivo edilicio. Por tanto, es necesario enfriar el suelo por debajo de su temperatura natural.

Una de las experiencias llevadas a cabo en zonas de clima cálido y árido, como es el caso de San Juan, es la de Neguev (Israel). Por las características desérticas de la región, en la Universidad Ben Gurion, Sede Boquer, se experimentó cubriendo el suelo con 10cm de una capa de áridos, la cual era mojada muy temprano en la mañana. La condición fue que el suelo no fuera arenoso, a fin de que retuviera la humedad. El monitoreo consideró 10cm, 30cm y 60cm de espesor. Desde el comienzo del regado de la capa de áridos hasta que el suelo registró un equilibrio térmico, pasó aproximadamente una semana; equilibrio que se tornó continuo, siempre que no cesara el regado. Si esto último ocurría, en 5 días aumentaba la temperatura (Givoni, 1984).

Para Hazim Zaki, Al-musaed y Khalil (2005), los diseños de tubos enterrados exhiben una variada combinación en tamaño y forma: algunos sistemas tienen tubos en paralelo que terminan en una cabecera, otros presentan un prototipo radial de recolección en un sumidero central (para facilitar la eliminación de humedad) y, en otros casos, se trata sólo de un tubo. Sostienen, además, que es importante diseñar el sistema para reducir al mínimo el costo y maximizar los beneficios, y, por otra parte, que la longitud de un tubo de más de 10m, por ejemplo, es ineficiente.

De igual forma, los tubos de diámetro pequeño son más eficaces por unidad que los tubos grandes y deben colocarse lo más profundamente posible, aunque no se registra especificaciones sobre dicha profundidad (De Paepe y Janssens, 2003; Rouag, Benchabane y Mehdid, 2018).

ADQUISICIÓN DE DATOS

A efectos de evaluar el real potencial de enfriamiento del sistema geotérmico en una zona árida y ante tanta disparidad de valores en la bibliografía específica, en el INEAA se está desarrollando una investigación con medición de valores de temperatura y humedad *in situ*. Desde diciembre de 2018 se registran valores de temperatura y humedad del



Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: Pitaluga et al, 2019, p. 4.

subsuelo en un área suburbana de San Juan (Rivadavia-San Juan), en simultáneo con mediciones de parámetros ambientales.

El sector en estudio (Figura 1) se ubica en el Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), complejo que congrega a varias facultades dependientes de la UNSJ. Geográficamente, se encuentra en el departamento de Rivadavia, situado al oeste de la ciudad capital de San Juan (Figura 1).

Con el fin de identificar los suelos presentes en el sector de estudio y reconocer las principales características y cualidades que permitan entender su origen, conocer sus propiedades físicas y químicas y poder clasificarlos taxonómicamente, se realizó un estudio (Pitaluga, Ocaña y Cortez, 2019) cuyos objetivos específicos fueron:

- Caracterización edafológica del sector a analizar
- Determinación de propiedades físicas de los suelos
- Muestreo para caracterización de propiedades en laboratorio
- Clasificación taxonómica de los suelos presentes

El sitio de observación se encuentra en la porción proximal del mega-abanico de Tulúm, geoforma desarrollada en el denominado valle de Tulúm, que corresponde a una depresión intermontana de origen tectónico, rellena con centenares de metros de depósitos fluviales de



Figura 2. a) Estación meteorológica, b) Calibración, c) Colocación de termocuplas en el terreno. Fuente: Elaboración de los autores.

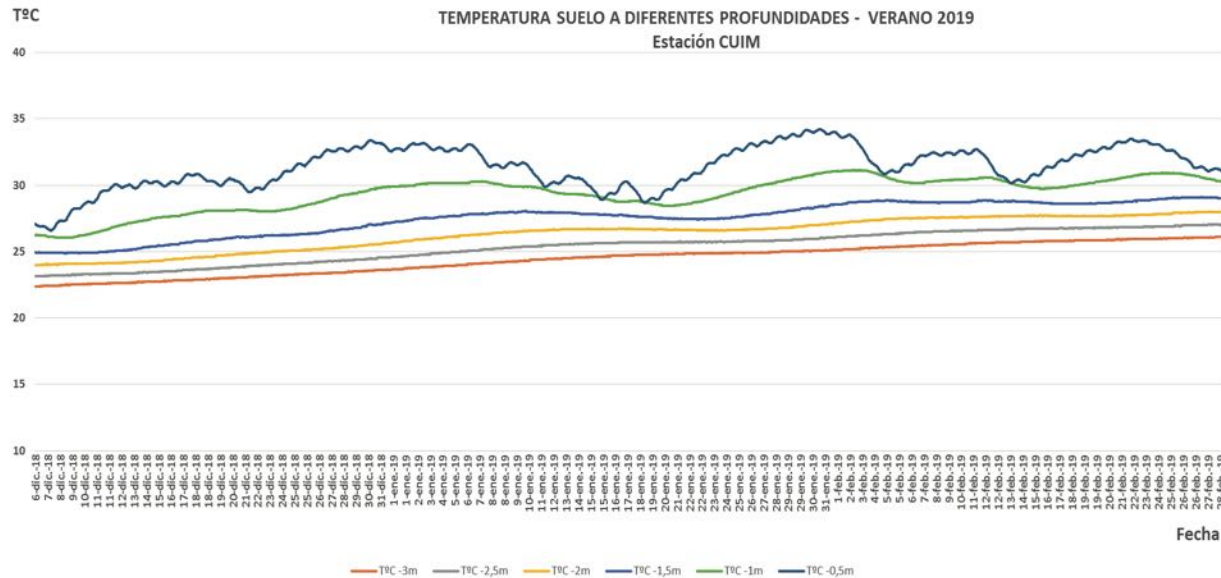


Figura 3. Temperaturas del aire y del suelo a distintas profundidades Fuente: Elaboración de los autores.

edad cuaternaria. Las muestras analizadas presentan una estructura en bloques relativamente grandes que indican que el suelo resiste a la penetración y al movimiento del agua. El tamaño promedio de los agregados individuales se puede clasificar como *grueso* a *muy grueso* y el grado de desarrollo es *muy fuerte*. Con el análisis de pH, las capas seleccionadas evidencian, asimismo, valores que oscilan entre 6.67 y 8.03, a partir de los cuales es posible clasificar al suelo como *moderadamente básico* a *neutro*. Los escasos contenidos de materia orgánica en las muestras indican la presencia de un suelo joven, desarrollado en climas secos y cálidos, derivados de materiales con texturas gruesas.

Para las mediciones geotérmicas se instalaron pares de termocuplas desde 0,50m hasta 3,00m de profundidad (Figura 2 c), con un intervalo de 0,50m y un sensor de humedad a una profundidad de 1,5m. La información se

almacenó en una tarjeta SIM colocada en el dispositivo electrónico de control que recibía la señal de los sensores enterrados. A esta información se accedió periódicamente con una notebook, la que fue complementada con los registros de una estación meteorológica automática (Figura 2 a y b), que mide temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar, precipitaciones y presión atmosférica, entre otras variables. Los registros de ambos sistemas se realizan con intervalos de 1 hora.

PROCESAMIENTO DE DATOS DE TEMPERATURA

La información meteorológica recabada se procesó para obtener las condiciones propias del verano, considerando el período comprendido entre los meses de diciembre de

HORA	-3m	-2,5m	-2m	-1,5m	-1m	-0,5m	EXT	Dif. Aire/Suelo(-3m)
0	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,5	27,2	2,8
1	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,5	26,3	2,0
2	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	25,6	1,2
3	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	24,9	0,5
4	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	24,1	-0,3
5	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	23,3	-1,1
6	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	22,7	-1,7
7	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	22,3	-2,1
8	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	23,5	-0,9
9	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	25,1	0,7
10	24,4	25,4	26,4	27,6	29,5	31,7	26,4	2,0
11	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	27,7	3,3
12	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	29,0	4,6
13	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	30,3	5,9
14	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	31,3	6,9
15	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	32,2	7,8
16	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	32,8	8,4
17	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	33,1	8,7
18	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	33,1	8,7
19	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	32,7	8,3
20	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	31,6	7,2
21	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	30,3	5,9
22	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	29,2	4,8
23	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	28,2	3,8
PROMEDIO	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	28,0	3,6

Tabla 1. Valores de temperaturas promedio horarias para verano. Fuente: Elaboración de los autores.

2018, enero y febrero de 2019. Se promediaron los pares de registros horarios a igual profundidad y, posteriormente, los 60 valores correspondientes a cada hora del día, obteniéndose así un registro para cada hora del día promedio de verano. En la Figura 3 se exponen la temperatura ambiente y las registradas a distintas profundidades de suelo, en el período considerado.

Los valores promedio para cada hora del período estudiado se muestran en la Tabla 1.

En la Figura 4 se grafican los promedios horarios estacionales para verano de las variaciones de temperatura del aire y del suelo a distintas profundidades.

Si bien hasta el presente la cantidad de registros en el CUIM es escasa (7 meses), las mediciones realizadas no confirman

las estimaciones de Hollmuller y Lachal (2005), según las cuales, en cualquier parte del mundo, de día o de noche, en invierno o en verano se tienen temperaturas del suelo de 15°C. En cambio, se acercan en mayor medida a lo sostenido por Baver *et al.*, (1991), quienes establecen que la temperatura a una profundidad de 2m corresponde a la media de la temperatura anual. Al respecto, y como indica la estadística del clima urbano del Área Metropolitana de San Juan (Ortega, Montilla y Cúnsulo, 2013), la temperatura a 2m de profundidad es de 21.07°C.

Para Iannelli *et al.* (2013), las propiedades térmicas del suelo hacen que las variaciones diurnas de la temperatura no penetren más allá de 0,5m, pero las variaciones anuales de temperatura llegan hasta una profundidad de unos 4m. Más allá de estas profundidades, la temperatura de la tierra se mantiene constante todo el año. Su valor es

aproximadamente 1,7°C mayor que el valor medio de la temperatura anual del aire en superficie. No obstante, se observa que las temperaturas registradas por los sensores instalados en el CUIM muestran valores superiores a los indicados por esa bibliografía.

Con los valores de temperatura del suelo obtenidos, se elaboraron dos gráficos que muestran el perfil de esa variable climática en las horas de máxima y mínima exterior (07h y 17h). Estos se presentan en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

APLICACIÓN DEL SISTEMA GEOTÉRMICO EN LA CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA SOCIAL

A efectos de diseñar el sistema de refrescamiento geotérmico, aplicándolo a una vivienda bioclimática de tres dormitorios de interés social (Kurbán, Cúnsulo, Matar, Ripoll y Ortega, 2017), se parte del cálculo del caudal necesario para climatizar el volumen de la vivienda, el cual

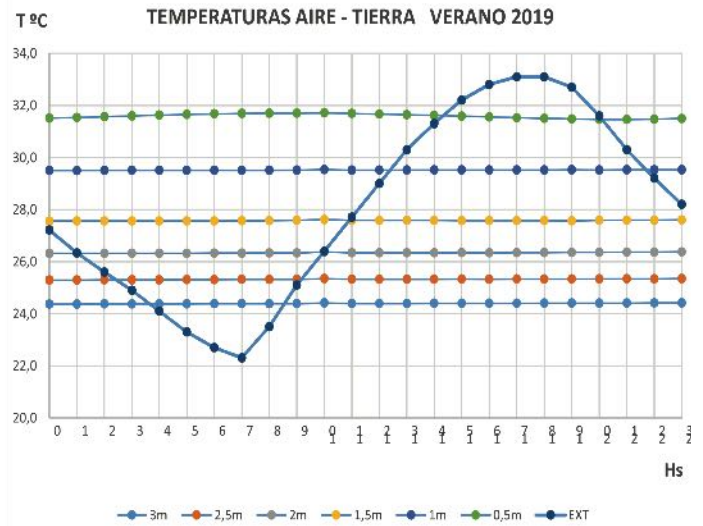


Figura 4. Temperaturas del subsuelo a distintas profundidades. Fuente: Elaboración de los autores.

VARIACIÓN DE TEMPERATURA AIRE - TIERRA
Verano 07Hs

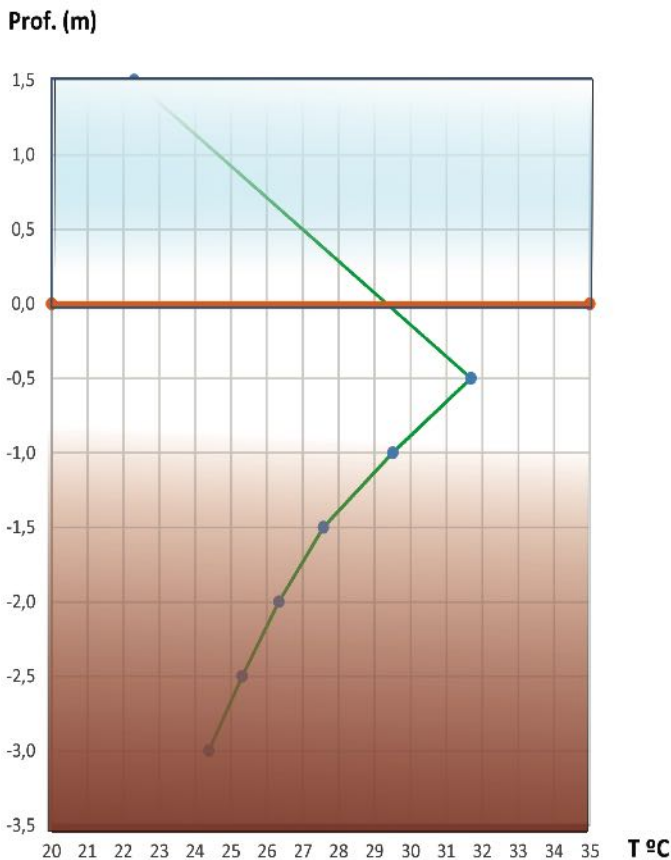


Figura 5. Perfil de temperatura del aire y del suelo a las 07 h. Fuente: Elaboración de los autores.

VARIACIÓN DE TEMPERATURA AIRE - TIERRA
Verano 17Hs

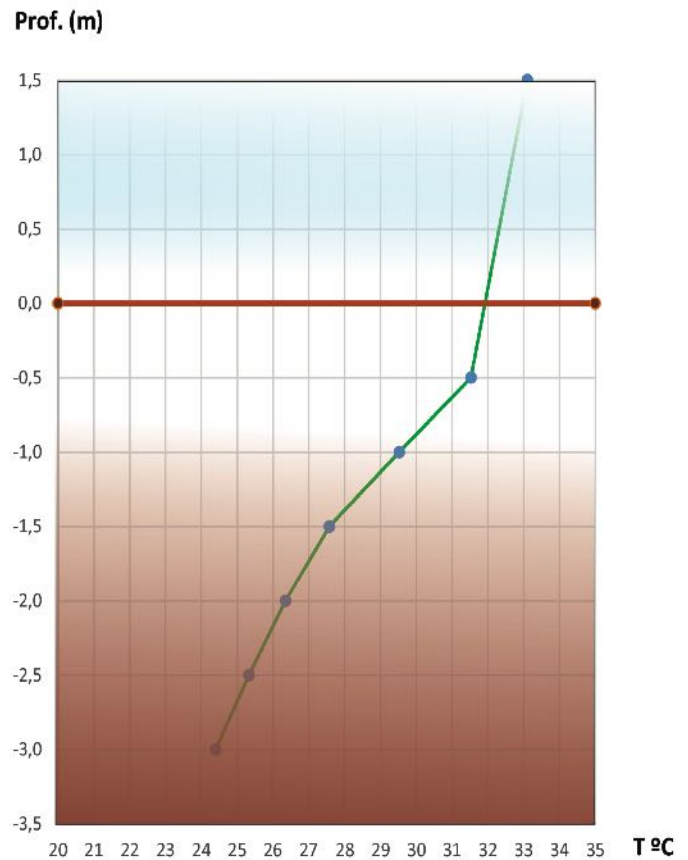


Figura 6. Perfil de temperatura del aire y del suelo a las 17 h. Fuente: Elaboración propia

fue de 212m³/h. Inicialmente, se considera una velocidad de 3m/s dentro del conducto de PVC de 200mm de diámetro y 5,9mm de espesor de pared, con una conductividad térmica = 0.17W/m²K.

El caudal de aire que pasa por cada ducto está dado por la siguiente expresión:

$$q_t = A * v = \pi 0.1^2 m^2 * 3 \frac{m}{s} = 0.09 \frac{m^3}{s} = 325 m^3/h$$

Donde

(m²) es el área del ducto y (m/s) es la velocidad del aire en el ducto.

Con este valor se calcula la cantidad de ductos necesarios en función del caudal necesario y del disponible, de acuerdo a la sección del ducto seleccionado. Se redondea al entero superior.

$$n = \frac{q_T}{q_t} = \frac{212 m^3/h}{325 m^3/h} = 0.65 \rightarrow n = 1$$

Es decir que con un solo tubo alcanza para cubrir la demanda de aire. Con este valor, se calcula la longitud de la tubería en función de la temperatura interior deseada (25°C), del aire de entrada (33,15°C) y de la del terreno a 3m de profundidad (24.4°C).

Para determinar la superficie de intercambio de calor y la longitud de la tubería, es necesario calcular la temperatura media dentro del conducto T_{ma} .

$$T_{ma} = \frac{(T_{ae} + T_{as})}{2} = \frac{33.15^\circ C + 25^\circ C}{2} = 29^\circ C$$

Siendo T_{ae} la temperatura a la entrada del ducto (°C) y T_{as} la temperatura a la salida.

A fin de evaluar el intercambio de calor entre el suelo y el aire que circula, se calcula la resistencia térmica (m²°C/W) del conducto, la cual está dada por la resistencia de conducción R_{cond} y la resistencia de convección R_{conv} .

$$R = R_{cond} + R_{conv}$$

Para definir la R_{cond} , se tiene en cuenta el espesor de la pared del ducto (e=0.0059m) y la conductividad térmica ($\lambda = 0.17W/m^2K$)

$$R_{cond} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0.0059}{0.17} = 0.035 m^2 \text{°C/W}$$

La resistencia por convección R_{conv} es función de la velocidad del aire, v(m/s) está dada por la expresión:

$$R_{conv} = \frac{1}{5.55 v^{0.8}} = \frac{1}{5.55 * 3^{0.8}} = 0.075 m^2 \text{°C/W}$$

En consecuencia,

$$R = R_{cond} + R_{conv} = 0.035 + 0.075 = 0.11 m^2 \text{°C/W}$$

El flujo de calor medio por unidad de superficie (W/m²) es proporcional a la diferencia de temperatura entre el suelo y el interior del ducto e inversamente proporcional a la resistencia térmica de la pared del ducto.

$$T_{ma} = 29^\circ C = 302 \text{ °K}$$

$$T_{tierra} = 24^\circ C = 297 \text{ °K}$$

$$R = 0.11 m^2 \text{°C/W}$$

$$\phi_m = \frac{(T_{ma} - T_{tierra})}{R} = \frac{302^\circ K - 297^\circ K}{0.11 m^2 \text{°C/W}} = 45.5 W/m^2$$

La energía que es necesaria extraer del aire dentro del ducto es (Ws/m³) y está dada por la fórmula:

$$E_e = \left(\frac{i}{V_e} \right)_{entrada} - \left(\frac{i}{V_e} \right)_{salida}$$

Siendo:

i : Entalpia del Aire Seco

V_e : Volumen Especifico del Aire

De la carta psicométrica, que considera una humedad relativa del 35%, se obtienen los valores de i y V_e a la entrada y a la salida, contemplando las temperaturas de aire a la entrada y salida, respectivamente.

Temperatura Aire de Entrada (T_{ae}) = 33.15°C

Humedad Relativa = 35%

De la carta psicométrica, se obtiene entonces:

Entalpia del Aire Seco $i = 62 \text{ kJ/Kg}$

Volumen Especifico del Aire $V_e = 0.88 \text{ m}^3/\text{Kg}$

Temperatura Aire de Salida) = 25°C

Humedad Relativa = 35%

De la carta psicométrica, se obtiene entonces:

Entalpia del Aire Seco $i = 42.5 \text{ kJ/Kg}$

Volumen Especifico del Aire $V_e = 0.85 \text{ m}^3/\text{Kg}$

Reemplazando los valores en la fórmula anterior, se obtiene:

$$E_e = \left(\frac{i}{V_e} \right)_{entrada} - \left(\frac{i}{V_e} \right)_{salida} = \left(\frac{62 \text{ kJ/kg}}{0.88 \text{ m}^3/\text{kg}} \right)_{33.1^\circ C} - \left(\frac{42.5 \text{ kJ/kg}}{0.85 \text{ m}^3/\text{kg}} \right)_{25^\circ C} =$$

$$E_e = 20.45 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} = 20450 \text{ Ws/m}^3$$

El área de intercambio necesaria $S(m^2)$ resulta:

$$S = (E_e * q_t) / \phi_m = \frac{(20450Ws/m^3 * 0.09m^3/s)}{45.5W/m^2} = 40.45m^2$$

Para calcular la longitud del ducto, resta dividir la superficie de intercambio, teniendo en cuenta el diámetro (D) de los caños.

$$L = \frac{S}{\pi D} = \frac{40.45m^2}{\pi 0.2m} = 64.3m \cong 64m$$

Si se baja la velocidad del aire a 2m/s, el caudal de aire que circularía por los ductos sería de 0.06m³/s, y la longitud de los ductos podría reducirse a 27m.

CONCLUSIONES

El sistema de enfriamiento geotérmico es una buena alternativa a considerar para el acondicionamiento térmico de verano, especialmente en las horas en que la temperatura del aire exterior es de 35°C o más, ya que se consigue un salto térmico de 11°C. A esto se le debe agregar el efecto de refrescamiento que produce la ventilación por el movimiento del aire impulsada desde los ductos (Neila F., Bedoya C. (2001).

El sistema no es efectivo en algunas horas, sobre todo en las nocturnas, cuando la temperatura del aire exterior es más baja que la del suelo a 3m de profundidad. En estos casos, la estrategia de ventilación nocturna es más efectiva, a causa del refrescamiento.

La temperatura a 3m de profundidad en verano resulta aproximadamente 3°C más elevada que el promedio anual de temperatura del aire, con las características del suelo presente en el lugar de las mediciones. Esto puede variar en presencia de otro tipo de suelo, lo cual deberá validarse mediante estudios de campo.

La temperatura del suelo presenta una tendencia a seguir decreciendo en función de la profundidad, más allá de los 3m con el tipo de suelo analizado. En consecuencia, se podría obtener un mayor salto térmico enterrando la tubería a mayor profundidad, pero se debería estudiar el mayor sobrecosto a fin de evaluar su factibilidad y el tiempo de amortización.

A partir de los valores hallados, se puede afirmar que la implementación de un sistema geotérmico para refrescamiento edilicio resulta altamente beneficiosa desde el punto de vista del confort térmico de los habitantes y contribuye a generar importantes ahorros de dinero en climatización edilicia, es decir, colabora con la sustentabilidad del hábitat humano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, A., Ip, K., Miller, A. y Gidado, K. (2009). Thermal performance of earth-air heat exchanger for reducing cooling energy demand of office buildings in the United Kingdom. En *Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009*.

Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G.D. y Mathur, J. (2010). Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling. *Energy and Buildings*, 42 (5), 645-648.

Baver, L., Gardner, W. y Gardner, W. (1991). *Física de suelos*. Primera ed. México: Grupo Noriega.

Bisoniya, T. (2015). Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*, 3(18). DOI 10.1186/s40517-015-0036-2

Cabezas, A. (2013). Eficiencia energética a través de utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real "Casa Pomaret". Tesina final de Master en Edificación. Universidad Politécnica de Catalunya – UPC, Barcelona.

Cohenca, D., Bordas, M., Schwartzman, D. (2013). Caracterización de las propiedades térmicas del suelo – Campus universitario San Lorenzo –Paraguay. En *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 1 (pp. 08.43-08.52). Salta: ASADES.

De Paepe, M. y Janssens, A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 35(4), 389-397.

Flores Larsen, S., Hernández, A., Lesino, G. y Salvo, N. (2001). Measurement and simulation of the thermal behavior of a massive building with passive solar conditioning. En *Proceedings of VII International Building Simulation Congress* (pp. 183-190), Río de Janeiro, Brazil.

Flores Larsen, S. y Lesino, G. (2001). Modelización de intercambiadores tierra-aire para acondicionamiento térmico de edificios. En *Actas del 8° Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia* (LATCYM 2001), México.

Givoni, B. (1984). Curso Extensivo "Acondicionamiento térmico para edificios en verano, mediante energías naturales". Mendoza (5 al 28 de mayo).

Hazim Zaki, H., Al-musaed, A. y Khalil, A. (2005). En *Thermal earth inertia such a source of energy for bio-sustainable house. The 2005 World Sustainable Building Conference*, Tokyo.

Hollmuller, P. y Lachal, B. (2005). *Buried pipe systems with sensible and latent heat. Exchange validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring*. Montreal: Escuela Politécnica de Montreal.

Iannelli, L., Bezzo, E., Bermejo, A., Cozza, P., Fiora, J., Niño, J., Prieto, R., Romero P., Gil S. (2013). La tierra como acondicionador natural de ambientes. En *Primer Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía* (25-27 septiembre 2013), Universidad de Buenos Aires (UBA), Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

Iannelli, L. y Gil, S. (2012). Acondicionamiento térmico de aire usando energía geotérmica-ondas de calor. *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 6(1), 100.

Kurbán, A., Cúnsulo, M., Álvarez, A., Montilla, E. y Ortega, A. (2015). The role of bioclimatic architecture in the reduction of the emission of CO₂ in arid environments. *Environmental Science*, 11(6), 171-178.

Kurbán, A., Cúnsulo, M., Matar, M., Ripoll, V. y Ortega, A. (2017). Social bioclimatic urban prototype in arid area. Energy and economic assessment. *International Journal of Applied Science and Technology*, 7(4).

Neila, F. y Bedoya, C. (2001). *Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental*. 2ª Edición. Madrid: Murilla –Lería.

Ortega A., Montilla E. y Cúnsulo M. (2013). Clima urbano árido. Base de datos para estudios del Área Metropolitana de San Juan. *AVERMA*, 17, 11.19 a 11.26.

Pittaluga, A., Ocaña, E. y Cortez, V. (2019). *Estudio de suelos en el área del Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM)*. Rivadavia - Provincia de San Juan. (Inédito).

Rouag, A., Benchabane, A. y Mehdid, C. (2018). Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I. A new transient semi-analytical model for determining soil temperature. *Journal of Cleaner Production*, 182, 538-544.

Tiwari, G., Singh, V., Joshi, P., Shyam, D. A., Prabhakant, G. A. (2014). Design of an Earth Air Heat Exchanger (EAHE) for Climatic Condition of Chennai, India. *Open Environmental Sciences*, 8, 24-34.

Vidal J. y Vidal O. (2011). Instalaciones de ventilación. En: *Sistemas Eficientes de Climatización* (pp. 2-8). Barcelona: La Salle - Universitat Ramón Llull.

Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Arce, J. Álvarez, G., Ramírez-Dávila, L. y Noh-Pat, F. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger: the effect of thermal insulation. *Energy and Buildings*, 85(Suppl. C), 356-361.