

ANÁLISIS DE LA PROFUNDIDAD ÓPTIMA PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE EN ARTEAGA, COAHUILA

ANALYSIS OF THE OPTIMAL DEPTH FOR GROUND-AIR HEAT EXCHANGER IN ARTEAGA, COAHUILA

ALOMA FRIGEIRO ¹

MARÍA EUGENIA MOLAR
OROZCO ¹

GONZALO BOJORQUEZ
MORALES ³

RESUMEN

El intercambiador de calor tierra-aire es un sistema de bajo consumo energético compuesto de tubos enterrados que aprovechan la energía geotérmica para calentar o refrigerar el aire. Este sistema ha atraído gran atención en los últimos años por su bajo consumo energético. Sin embargo, requiere un análisis de diseño específico dependiendo del lugar de instalación, su clima y tipo de suelo. En el presente trabajo se analiza la profundidad óptima de instalación del sistema para Arteaga, Coahuila con dos variables: medición in situ y modelado computacional. La metodología tuvo un enfoque cuantitativo realizando trabajo de campo y de laboratorio computacional. Se realizaron mediciones con un aparato de cuatro canales con termopares tipo K tomando en cuenta temperatura ambiente, temperatura de suelo a un metro, a dos metros y a tres metros de profundidad. Con base en los resultados obtenidos se analizó por modelado computacional las variaciones de temperatura de la salida del sistema, tomando en cuenta la temperatura promedio en las tres diferentes profundidades. Los resultados obtenidos mostraron que la temperatura promedio del suelo a un metro de profundidad es de 16.1°C, a dos metros de profundidad es de 18.0°C y a tres metros de profundidad 19.2 °C variando máximo 1°C, la tubería a tres metros de profundidad tiene una mejor eficiencia para la instalación del intercambiador de calor tierra-aire logrando una variación de hasta 7.5°C.

1. Doctorado en Arquitectura y Urbanismo, Facultad de Arquitectura, Unidad Sureste, UAdeC.
2. Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California.

Correspondencia
alomafrigeiro@uadec.edu.mx

Palabras clave: intercambiador de calor tierra-aire; temperatura del suelo; modelado computacional.

ABSTRACT

The ground-air heat exchanger is a low energy consumption system composed of buried tubes that take advantage of geothermal energy to heat or cool the air. This system has attracted great attention in recent years for its low energy consumption, however, it requires a specific design analysis depending on the installation site, its climate and soil type. In this work, the optimal installation depth of the system for Arteaga, Coahuila is analyzed with two variables: in situ measurement and computational modeling. The methodology had a quantitative approach, carrying out field and computational laboratory work, measurements were carried out with a four-channel device with type K thermocouples considering ambient temperature, soil temperature at one meter, two meters and three meters deep. Based on the results obtained, the temperature variations at the system outlet were analyzed by computational modeling, considering the average temperature at the three different depths. The results obtained showed that the average soil temperature at one meter depth is 16.1°C, at two meters depth it is 18.0°C and at three meters depth it is 19.2°C, varying a maximum of 1°C, the pipe at three meters depth has a better efficiency for the installation of the ground-air heat exchanger, achieving a variation of up to 7.5°C.

Keywords: *ground-air heat exchanger; soil temperature; computational modeling.*

INTRODUCCIÓN

El uso de aires acondicionados y ventiladores eléctricos para mantener los ambientes frescos representan, en la actualidad, un 20% del total de la electricidad que utilizan los edificios de todo el mundo (IEA, 2018). En la región cálida extrema de México el 48.1% de las viviendas tienen al menos un equipo de aire acondicionado sumando 5.6 millones de equipos instalados en el 2018. El 20.4% de viviendas en la región cálida extrema de México utilizan algún tipo de calefacción, más de 2 millones de equipos funcionando en el 2018

como se puede observar en la Figura 1 (INEGI, 2018).

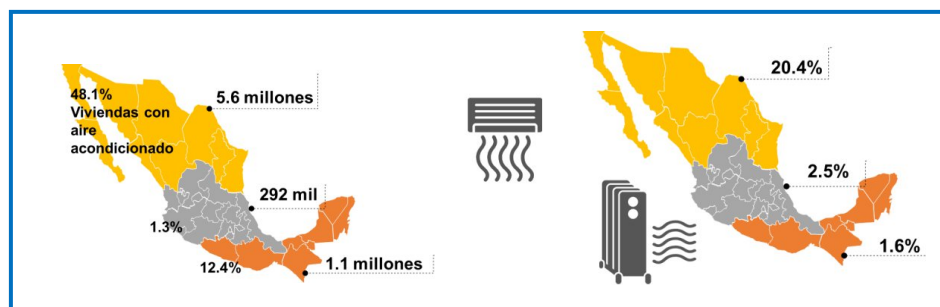


Figura 1. Número de equipos de aire acondicionado, porcentaje de viviendas con al menos un equipo, por región climática y porcentaje de viviendas particulares habitadas en las que usan calefactor por región climática.

Fuente: (INEGI, 2018)

Las personas se encuentran en el interior de los edificios el 90% de su tiempo, sea en su vivienda, de un familiar, en el trabajo o en centros comerciales (López y otros, 2021). En la actualidad, el incremento de tecnologías ha provocado un aumento exponencial del consumo energético (Díaz-Hernández, 2017). Por lo que es necesario una solución al alza de temperaturas exteriores, sin técnicas que aumenten el consumo energético. Los objetivos de desarrollo sostenible pactados por la ONU representan un acuerdo para protección del planeta que actúan directamente los puntos mencionados anteriormente, el 7° Energía asequible, el 11° Ciudades y comunidades sostenibles y el 12° Producción y consumo responsable pueden ser abarcados con la instalación del sistema de bajo consumo de energía intercambiador de calor tierra-aire aprovechando de la energía geotérmica.

El intercambiador de calor tierra-aire depende de la temperatura ambiente de cualquier ubicación, se puede utilizar para refrigeración o calefacción en verano e invierno. La tierra se utiliza como sumidero o fuente de calor. El sistema utiliza un conjunto de tubos enterrados en el suelo a cierta profundidad donde el aire fluye por la tubería y al entrar en contacto con el terreno la temperatura aumenta o disminuye por conducción (Bordoloi y otros, 2018). La eficacia del sistema depende de varios factores, esta investigación se enfoca en determinar la profundidad del sistema, el cual se ve afectado

principalmente por las condiciones climáticas y características del suelo.

El sistema explota la diferencia de temperatura entre el aire que pasa a través de los conductos enterrados utilizando el suelo como fuente de calor o sumidero, esto logra calentar el aire en invierno y enfriarlo en verano. (Brum y otros, 2019). Debido a la importancia de este intercambio de calor, es necesario analizar la temperatura a diferentes profundidades y determinar la profundidad óptima de instalación del sistema, teniendo en cuenta el costo de excavación y el beneficio en cuestión térmica. El no tener en cuenta las condiciones del suelo puede llevar a una variación de resultados entre el 2 y 20% en la capacidad de refrigeración o calefacción (Zajch & Gough, 2021).

La investigación de temperatura a diferentes profundidades también se realizó en Irak, donde se instalaron siete termopares en cada profundidad (0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 y 5.0 m), y en la superficie del suelo, se concluyó que a partir de 3 metros de profundidad las diferencias de temperatura alcanzan hasta los 17°C, si se instalan los sistemas a menor profundidad se pueden utilizar para pre-enfriar o precalentar debido a que la temperatura se ve afectada directamente por la temperatura ambiente (Mohammed y otros, 2021).

Diversos autores realizan modelados computacionales, un análisis con el simulador MATLAB, para condiciones climáticas cálidas y secas, calcula por medio de ecuaciones la temperatura del suelo y determina que la temperatura es “relativamente constante” y con base a esa conclusión determina la profundidad óptima de seis metros (Mohammed y otros, 2023).

Según la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 54/153 sección 5.2.5.3 Calidad del ambiente interior menciona que en el interior de la edificación deben existir parámetros de confort térmico, con temperaturas entre los 18 y 25°C favoreciendo las soluciones bioclimáticas sobre las mecánicas (NORMA MEXICANA, 2013).

El objetivo de esta investigación es analizar la profundidad óptima para la instalación de un intercambiador de calor tierra-aire en Arteaga, Coahuila, tomando en cuenta mediciones *in situ* de la temperatura del suelo a diferentes profundidades concluyendo el análisis con un modelado computacional donde se simulan tres diferentes

posibilidades de instalación, a uno, dos y tres metros de profundidad analizando la efectividad del sistema. La metodología utilizada fue cuantitativa realizando trabajo de campo y de laboratorio computacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

El municipio de Arteaga se ubica al norte del país y al sureste del estado de Coahuila de Zaragoza (Figura 2), sus coordenadas geográficas son: 25° 27' 0" Norte, 100° 50' 56" Oeste y 1,684 msnm de altitud. Limita al norte con el municipio de Ramos Arizpe, Coahuila y al noreste con Santiago, Nuevo León; al sur y al este con el estado de Nuevo León (Municipios de Rayones y Galeana) y al oeste con el Municipio de Saltillo (Flores, 2022).

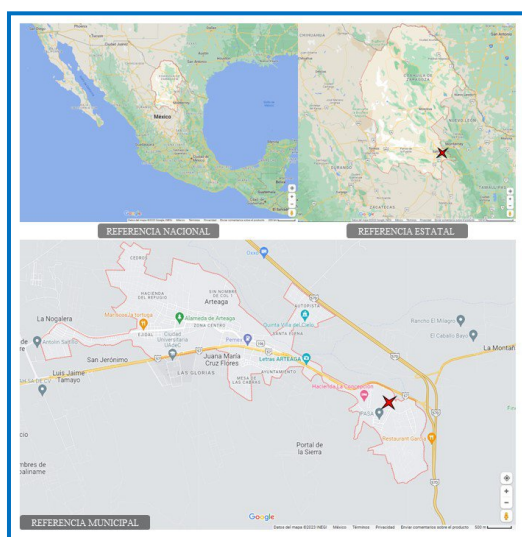


Figura 2. Ubicación geográfica de caso de estudio referencial nacional, estatal y municipal.

Fuente: Google maps modificada por elaboración propia.

Los tipos de suelo para Arteaga en general son Lutita-Arenisca, sin embargo, para poder obtener el tipo de suelo específico del caso de estudio se realizaron pruebas de mecánicas de suelos en el terreno, las muestras se obtuvieron de la siguiente manera: PCA-1 de 2.20 metros de profundidad y la PCA-2 2.30 metros (Figura 3). En la Tabla 1 se puede observar que el tipo de suelo según la clasificación SUCS es de tipo grava mal graduada con arcilla, el porcentaje de contenido natural de agua varía de 5.7% a 6.9%, las muestras se tomaron en

mayo del 2023 en la temporada seca sin precipitación.



Figura 3. Sondeos realizados PCA-1 y PCA-2 en el cual se demuestra la estratigrafía homogénea.

Fuente: Elaborado por Tecnocapital de México 2023.

Tabla 1. Resultado de mecánica de suelos

SONDEO No	PCA-1	PCA-2
MUESTRA DEL TIPO	ALTERAD A	ALTERAD A
Profundidad total del sondeo (m)	2.20	2.30
Despalme (m)	0.00	0.00
Profundidad del estrato de muestreado (m) a	0.40	0.40
Tamaño máximo (mm)	63.5	63.5
% Retenido en malla de 75 mm	0.00	0.00
% que pasa la malla no 4.750 mm	39	26
% que pasa la malla No 0.425 mm	10	13
% que pasa la malla No 0.075 mm	5	10
Límite líquido (%)	43	33
Límite plástico (%)	24	18
Índice plástico (%)	19	15
Contracción lineal	7.3	5.3
Contenido natural de agua (%)	5.7	6.9
Peso esp. Seco suelto (kg/m ³)	1,422	1,602
Clasificación S.U.C.S.	GP	GP-GC

Fuente: Elaborado por Tecnocapital de México 2023.

Para realizar la excavación se elaboró un equipo manual que se puede observar en la Figura 4, consta de una broca barreno para tierra de 28 cm de diámetro unido a un tubo de 1.20 m de longitud, se realizaron pruebas con el equipo y debido a que el suelo consta de arcilla y diversos agregados rocosos se logró excavar alrededor de 70 cm con dificultad, fue necesario retirar la tierra del interior manualmente ya que la broca no la retenía, a esa profundidad era posible extraer la tierra mientras más profundo era el pozo se dificultaba la extracción. Otra limitante que se presentó durante el proceso fue que cuando la broca entraba en contacto con el agregado rocoso no permitía el giro

y se detenía el proceso de excavación limitando el avance.



Figura 4. Equipo de excavación manual

En consecuencia, de las limitantes presentadas por el equipo manual se optó por un equipo de perforación industrial. Se analizaron las opciones viables por cuestión de costos y la baja profundidad de excavación y se utilizó la perforadora de percusión a cable como se observa en la Figura 5, este sistema funciona por el golpe del trepano en cruz directamente sobre el fondo de la excavación, posterior se utiliza la válvula para extraer la tierra durante la perforación. Se solicitó al operador separar la tierra de manera ordenada por profundidad (uno, dos y tres metros). Con el proceso anterior se alcanzó una excavación de 3.20 m de profundidad y 17 cm de diámetro.



Figura 5. Excavadora de percusión a cable.

Para la instalación de los termopares se utilizaron tubos de PVC hidráulico de 3/4 in (Figura 6). En la parte superior se colocaron tapones para evitar que al momento de rellenar el pozo entrara tierra al tubo, la razón por la cual los termopares están dentro del tubo es para evitar, en caso de falla en el termopar, tener que volver a hacer la excavación, en pruebas anteriores los termopares después de un periodo de tiempo (aproximadamente 3 meses) al entrar en contacto con la humedad presentaban fallas en las mediciones.

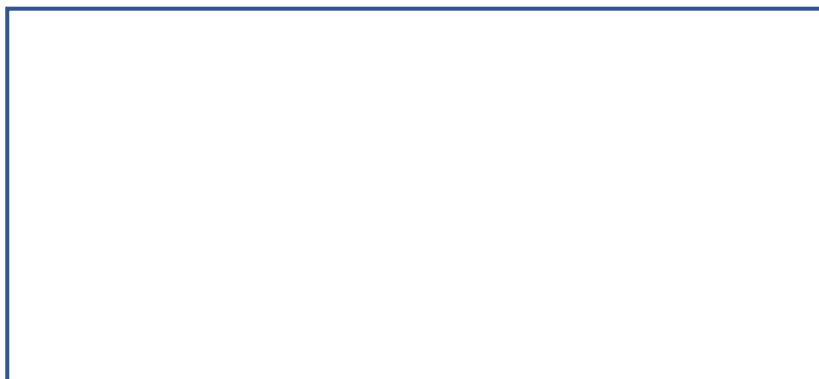




Figura 6. Instalación de termopares.

El proceso de instalación de los termopares se dio de la siguiente manera: se ubicó el tubo de tres metros de profundidad en el pozo y se rellenó con la tierra procedente de la excavación obtenida de dos a tres metros de profundidad con la perforadora de percusión a cable, hasta alcanzar la altura de dos metros. A partir de ahí se colocó el segundo tubo en contacto con la tierra a dos metros de profundidad, se continuó rellenando ahora con extracto obtenido de la perforación de uno a dos metros de profundidad llegando a la altura de un metro. Para concluir la instalación se coloca el último tubo de un metro de profundidad y se rellena con el estrado obtenido del nivel natural a un metro de profundidad. Para obtener la temperatura ambiente se instaló un tubo con un termopar a una altura de 1.50 m por encima del suelo natural, se protegió de la incidencia solar y se orientó hacia el Norte. En la Figura 7 se puede observar el aparato de medición ya conectado con sus 4 termopares, este se protegió con una bolsa plástica.



Figura 7. Termómetro 4 canales termopares tipo K.

Para poder determinar los parámetros óptimos del sistema investigado, se elaboraron varias simulaciones por medio del programa SolidWorks Flow Simulation, el cual utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes, modelos de turbulencia y modelos de fenómenos físicos. La simulación por medio de SolidWorks evidencia la temperatura a lo largo de los ductos, simula el proceso de transferencia de calor. Esto no se podría identificar en estudios experimentales o simulaciones de modelos unidimensionales (Valenzuela R., 2022).

En primer lugar, se elabora el modelo de la tubería:

1. Se utilizan la herramienta de Croquis 3d para hacer el desarrollo de la tubería, se ponen las cotas correspondientes (es importante en esta etapa tener muy bien determinado los ejes XZ, XY para poder distribuir la tubería en 3d tal cual se instalará en campo).
2. En seguida se utiliza la herramienta Croquis para elaborar la entrada del tubo, se selecciona el plano en planta y se dibuja un círculo del tamaño de la tubería, en el mismo croquis con la herramienta equidistanciar entidades se pone el espesor de la tubería.
3. Con la operación saliente/base barrido se solidifica la tubería (primero seleccionando los círculos y luego el desarrollo de la

tubería.

4. En seguida con Croquis se vuelven a dibujar círculos como tapas para la entrada y salida de la tubería, se extruye el elemento 10 cm y así se logra cerrar el circuito para hacer la simulación.

En seguida se procede a la simulación:

1. Se nombra el proyecto de simulación, luego solo se modifica la unidad de temperatura a °C, originalmente viene en Kelvin. En el siguiente apartado se selecciona el tipo de análisis como interno, en las condiciones del interior se excluye el análisis de los espacios que no tienen condiciones de flujo, solo se selecciona para características físicas condiciones de calor en sólidos. En las propiedades de fluidos únicamente se selecciona el aire y en las propiedades de sólidos se selecciona el material de la tubería. En las condiciones de pared se seleccionó temperatura de pared y se ingresa la temperatura que se somete en °C por profundidades (es necesario configurar que la primera parte no tiene contacto con el suelo por lo que tiene la misma temperatura de entrada, y a partir de 1, 2 y 3 metros tienen variación de temperatura según los resultados obtenidos en las mediciones del terreno). Por último, en las condiciones iniciales se modificaron la temperatura en parámetros de termodinámica, la temperatura en temperatura inicial del sólido y en coordenadas del sistema se cambió a Y debido a que el sistema fluye en ese sentido inicialmente.

2. Para ingresar el aire en el sistema se utiliza la herramienta de subdominio del fluido, donde se selecciona la tubería por el interior (para esto es necesario realizar un corte y exponer el interior de la tubería) y se determina el eje de las Y donde corre el aire.

3. En seguida se determina el material de la tubería por medio de la herramienta material sólido.

4. Condiciones de contorno es la herramienta que se va a utilizar para determinar donde entra y donde sale el aire, sin embargo, antes es necesario realizar un corte en la tubería con la herramienta vista de sección, ya elaborado el corte se procede a determinar los parámetros de las condiciones de contorno donde se selecciona la entrada del aire, se modifica el eje de las Y, se pone una velocidad

de entrada y se determina esa velocidad en m/s. Ya concluida la entrada es necesario determinar la salida del aire, se realiza otro corte en la tubería para exponer la salida y se configura la salida, a diferencia de la entrada, la salida del aire se utiliza la presión ambiental, se cambia el eje de salida a Z.

Una vez concluida la simulación para obtener resultados se selecciona impresiones XY, se determina que el croquis3d es el desarrollo que se va a visualizar y la temperatura del fluido. Para que la gráfica aparezca en la pantalla hay que seleccionar el XY impresión 1 y mostrar (Figura 8).

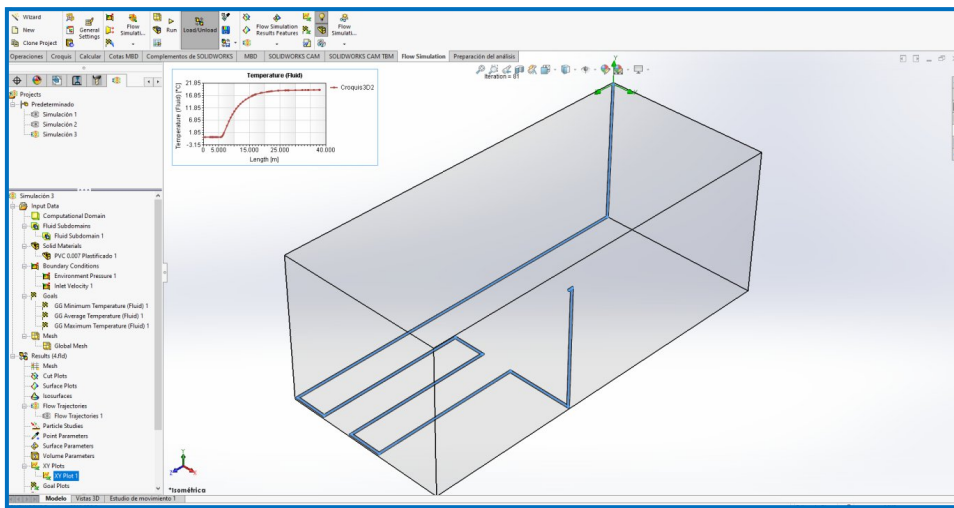


Figura 8. Resultados preliminares de simulación SolidWorks.

Es importante destacar que para la simulación se tomó en cuenta el fluido como aire, la tubería de PVC según especificaciones del software, la velocidad de aire de entrada al tubo de 1 m/s debido a que no se tomaron en cuenta caudales y si el intercambio de calor de la tubería y aire, la salida del tubo con presión atmosférica, para la temperatura de entrada se realizaron dos simulaciones: 11.6°C y 26.3°C. La simulación se desarrolló en estado estacionario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones in situ se obtuvieron de 1,084 tomas

de temperatura, con inicio desde el 13 de febrero del 2023 a las 00:08 al 15 de febrero del 2023 a las 19:38 que se presentan en la Figura 9, se puede observar cómo varía la temperatura ambiente al transcurso del día mientras que la temperatura a diferentes profundidades es más constante, a un metro de profundidad la temperatura promedio es de 16.1 °C, a dos metros de profundidad es de 18.0 °C y a tres metros de profundidad 19.2°C. Se tomaron las mediciones por este periodo para tener una muestra de la poca variación de temperatura a esas profundidades.

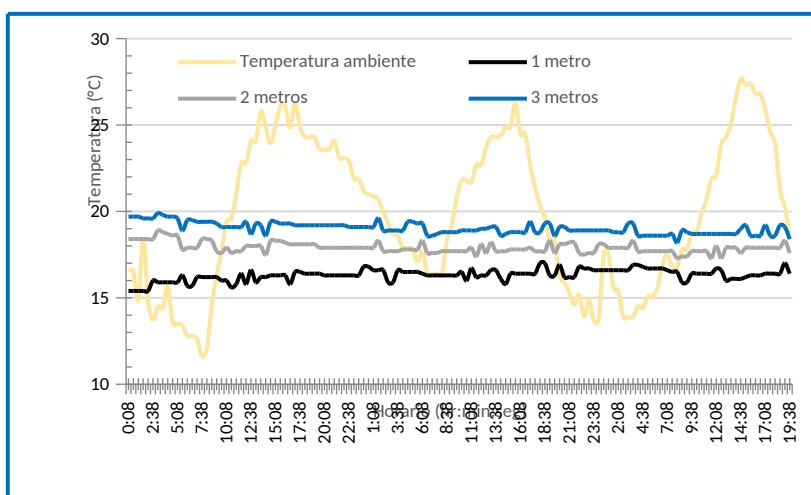


Figura 9. Resultados temperaturas a diferentes profundidades.

En la Figura 10 se pueden observar los resultados de 24 horas de mediciones, con inicio a las 7:08 del 13 de febrero del 2023 y termino a las 7:08 del 14 de febrero del 2023, la temperatura ambiente máxima fue de 26.3°C y la mínima fue de 11.6°C, con un rango de variación de 14.7°C.

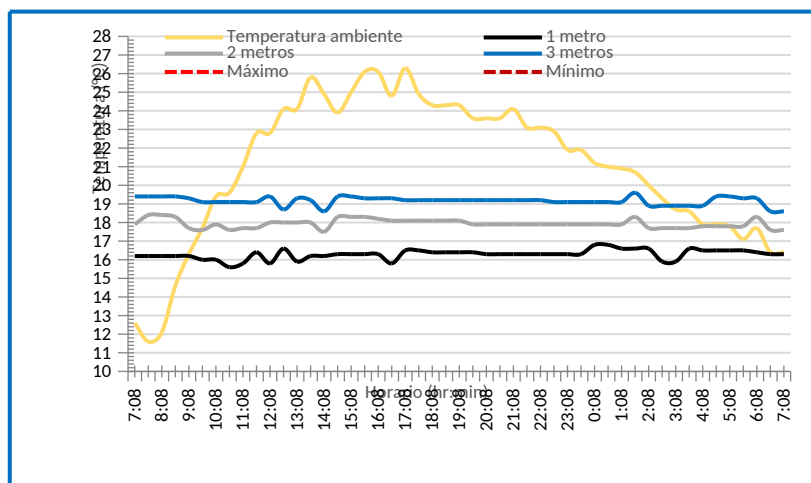


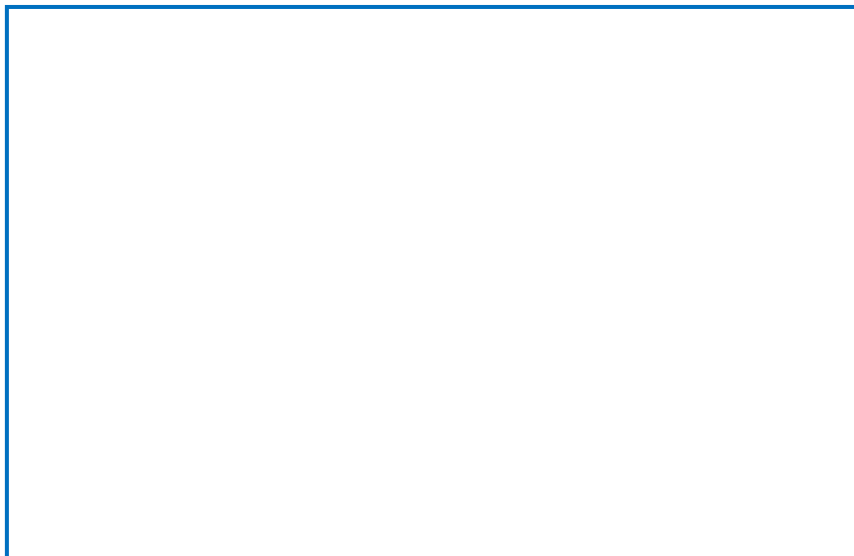
Figura 10. Resultados de 24 horas de temperaturas a diferentes profundidades.

La temperatura promedio anual en Saltillo del año 2023 según National Centers for Environmental information fue de 20.59°C (NCEI, 2024). En la Tabla 2 se puede observar un resumen de la Gráfica 2, donde tenemos las temperaturas máximas, mínimas y promedio de las mediciones de 24 horas, las variaciones de la temperatura a diferentes profundidades van de 0.8 a 1°C mientras que la temperatura ambiente varió 14.7°C. Es importante destacar que a mayor profundidad se acerca al promedio de la temperatura ambiente.

Tabla 2. Resumen de resultados 24 horas

	Temperatura ambiente (°C)	Un metro de profundidad (°C)	Dos metros de profundidad (°C)	Tres metros de profundidad (°C)
Máximo	26.3	16.8	18.3	19.6
Mínimo	11.6	15.8	17.5	18.6
Promedio	20.9	16.2	17.9	19.1

Para la simulación se utilizaron los resultados de la Tabla 2, se ingresa la temperatura ambiente de 11.6°C al inicio del sistema, se toma en consideración que la primera parte del recorrido de cero a 1.30 metros no tiene influencia con el suelo debido a que está en la superficie y no tiene contacto con el mismo, a partir de ahí empieza el intercambio de calor que se tomó en cuenta de la siguiente manera: a un metro de profundidad una temperatura de 16.2°C, a dos metros 17.9°C y a tres metros 19.1°C. Tampoco se considera el intercambio térmico en el tubo de ascenso debido a que el recorrido es únicamente de tres metros. Se puede observar en la Figura 11 la temperatura en los diferentes puntos del sistema simulado a tres metros de profundidad.



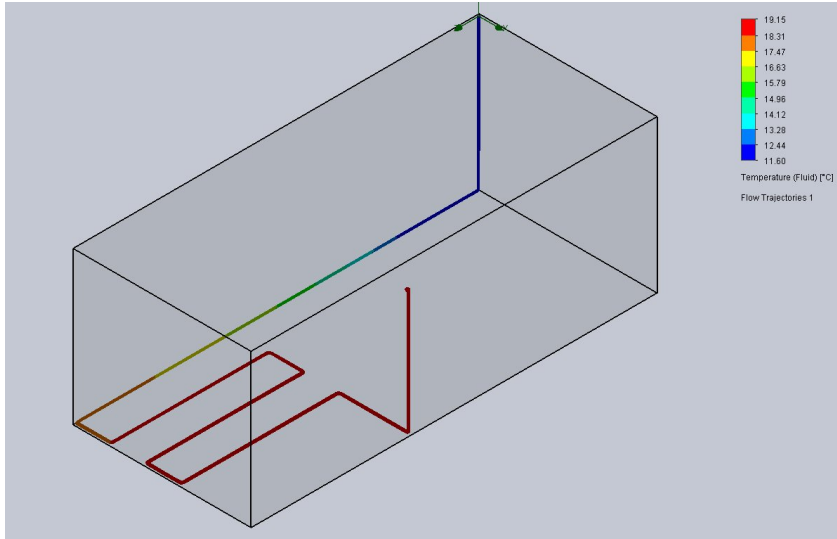


Figura 11. Resultado de temperatura a tres metros de profundidad y 11.6°C de entrada.

En la Figura 12 se pueden observar los resultados de la simulación, mientras más profundidad tiene el sistema, más alta es la temperatura que alcanza. En caso de todas las simulaciones la temperatura inicial es de 11.6°C, al terminar los recorridos de uno, dos y tres metros se alcanzan temperaturas de: 16.2°C, 17.9°C y 19.1°C respectivamente. La manera que se comporta el sistema es similar para las tres profundidades, sin embargo, mientras más profundidad mayor temperatura alcanzando una variación de 2.8°C.

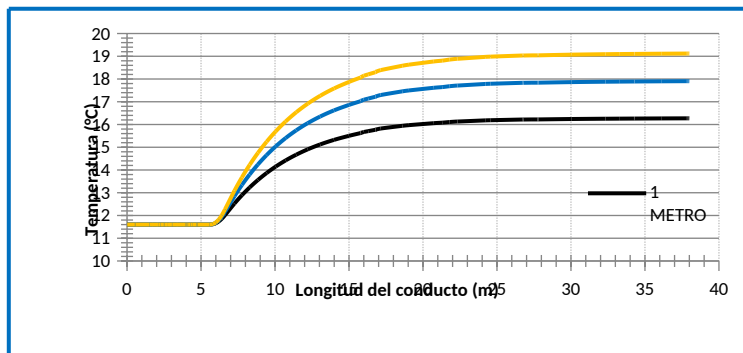


Figura 12. Resultados de simulación de la variación de temperatura al recorrer el sistema con tres diferentes profundidades, temperatura inicial 11.6°C

La Tabla 3 muestra los resultados iniciales y finales de la gráfica 3, así

como sus variaciones, en ella se puede observar una mayor variación de temperatura a tres metros de profundidad. Es importante destacar que la variación de temperatura depende directamente de la temperatura de entrada del tubo, para las simulaciones elaboradas en esta investigación se tomaron los extremos (temperatura máxima y mínima) con el objetivo de revisar sus comportamientos.

Tabla 3. Resultados de temperatura inicial del sistema y final según simulación

	Un metro de profundidad	Dos metros de profundidad	Tres metros de profundidad
Temperatura inicial (°C)	11.6	11.6	11.6
Temperatura final (°C)	16.27	17.90	19.11
Variación de temperatura (°C)	4.67	6.30	7.51

Si comparamos la Figura 11 y la Figura 13 las dos son simulaciones a 3 metros de profundidad con la diferencia de la temperatura de entrada, 11.6°C y 26.3°C respectivamente, se puede observar como en los dos casos la temperatura final del sistema es de 19.15°C lo que señala que el intercambio de calor del sistema alcanza la temperatura del suelo. Es importante destacar que el simulador no se utilizó con la herramienta de dependencia de tiempo, por lo que la simulación ocurre en estado estacionario hasta llegar al equilibrio.

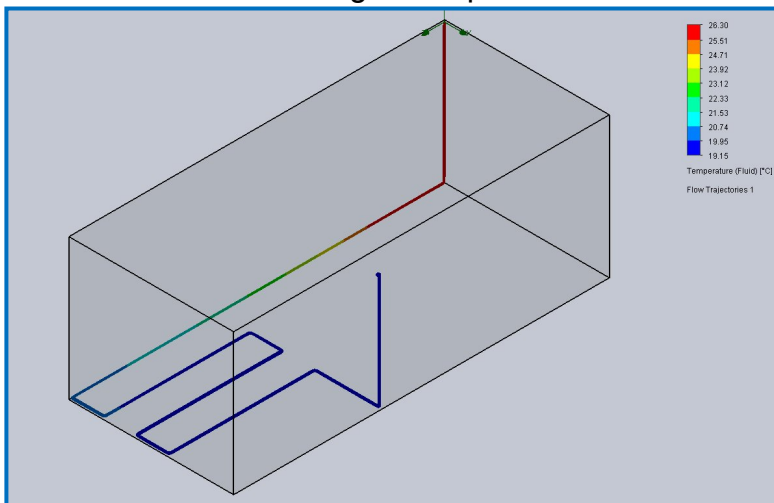


Figura 13. Resultado de temperatura a tres metros de profundidad y 26.3°C de entrada.

En la Figura 14 se puede observar el comportamiento del sistema cuando la temperatura inicial es de 26.3°C a diferencia de la gráfica 3 la temperatura tiende a bajar en todos los sistemas, hay menos

variación de temperatura en el sistema de tres metros de profundidad llegando a 19.18°C, mientras que el sistema a un metro de profundidad alcanza los 16.33°C. Como en la simulación anterior los resultados son próximos a las temperaturas del suelo.

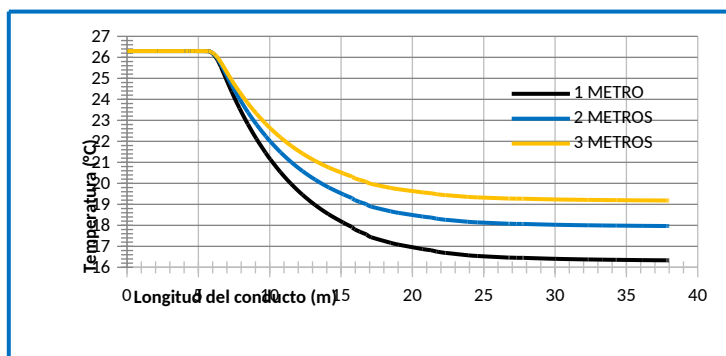


Figura 14. Resultados de simulación de la variación de temperatura al recorrer el sistema con tres diferentes profundidades, temperatura inicial 26.3°C

Es interesante el comportamiento de la variación de temperatura cuando inicia en los 26.3°C ya que a un metro de profundidad existe mayor variación que a tres metros, esto se debe a que a un metro de profundidad la temperatura del suelo es menor y al alcanzar el equilibrio la tendencia es que llegue a la misma temperatura. Esta variación se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de temperatura inicial del sistema y final según simulación

	Un metro de profundidad	Dos metros de profundidad	Tres metros de profundidad
Temperatura inicial (°C)	26.3	26.3	26.3
Temperatura final (°C)	16.33	17.96	19.18
Variación de temperatura (°C)	9.97	8.34	7.12

CONCLUSIONES

La temperatura del suelo en las mediciones realizadas in situ para esta investigación de uno, dos y tres metros de profundidad se

consideran relativamente constantes, aunque no se presentan variaciones como (Mohammed y otros, 2021) de 17°C comparados con la temperatura ambiente la mayor variación es de 8°C significativa para la instalación del intercambiador de calor tierra-aire, la cual puede traer un beneficio térmico al realizar la instalación del sistema.

Se concluye que mientras mayor profundidad del suelo la temperatura se asemeja al promedio de la temperatura ambiente coincidiendo con (Mohammed y otros, 2023), en cuestión a la variación de temperatura a uno, dos y tres metros no presentó diferencias significativas, las tres profundidades variaron menos de 1°C.

Si se compara con la norma mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013 la profundidad ideal para el intercambio de calor sería a tres metros donde la temperatura promedio es 19.15°C que se encuentra dentro del rango (18 y 25°C), sin embargo, se puede considerar la instalación a poco más de dos metros de profundidad ya que la variación es de 0.07°C.

La simulación demuestra que el comportamiento de la temperatura depende directamente de la temperatura del suelo y la tendencia es el equilibrio, esto se debe al software utilizado no realiza la simulación con tiempo. Sin embargo, al realizar la instalación del sistema se procura que este este en constante funcionamiento para poder alcanzar resultados similares a los estudiados.

Según los resultados de simulación la longitud del conducto para que ocurra el intercambio de calor puede ser de 25 metros lineales en vez de 38 metros como el propuesto, esto debido a que la variación de temperatura es menor a 1°C desde los 25 hasta los 38 metros, también se concluye que si se instala más tubería es irrelevante para la efectividad del sistema, por lo que el resultado de temperatura de salida sería el mismo.

REFERENCIAS

Bordoloi, N., Sharma, A., Nautiyal, H., & Goel, V. (2018). An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 261-280. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.056>

- Brum, R., Ramalho, J., Rodrigues, M., Rocha, L., Isoldi, L., & Dos Santos, E. (2019). Design evaluation of Earth-Air Heat Exchangers with multiple ducts. *Renewable Energy*, 135, 1371-1385. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.063>
- Díaz-Hernández, H. P.-C.-M. (2017). Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo. *Revista del Desarrollo Tecnológico*, 44-51.
- Flores, A. J. (2022). *Plan municipal de desarrollo urbano arteaga 2022-2024*. Periódico oficial del Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza.
- IEA, I. E. (2018). *The Future of Cooling, Opportunities for energyefficient air conditioning*. OECD/IEA.
- INEGI. (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares*. México: INEGI.
- López, J. A., Payán, A. T., Fernández, J., & Carmona, D. (2021). Calidad del aire interior en viviendas. Un asesino silencioso. *CERCHA* 147, 10-14.
- Mohammed, H., Zoltan , K., & János, B. (2023). Investigation of earth air heat exchangers functioning in arid locations using Matlab/Simulink. *Renewable Energy*, 209, 632-643. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.042>
- Mohammed, H., Zoltán, K., & Janos , B. (2021). The Readiness Investigation of The Ground Soil Temperature for Underground Heat Exchange Systems Installation in Hot Climates. *European Journal ofEnergy Research*, 1, 1-6. <https://doi.org/10.24018/ejenergy.2021.1.2.8>
- NCEI. (2024). *National Centers for Environmental Information*. Retrieved 2024, from <https://www.ncei.noaa.gov/>
- NORMA MEXICANA. (2013). *NMX-AA-164-SCFI-2013. EDIFICACIÓN SUSTENTABLE - CRITERIOS Y REQUERIMIENTOS AMBIENTALES MÍNIMOS* : <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3156.pdf>
- SENER, S. d. (2021). *Balance Nacional de Energía 2020*. México: Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.
- Valenzuela R., A. (2022). Diseño de un prototipo geotérmico con intercambiador de calor tierra-aire para la climatización de viviendas con condiciones ambientales de temperatura mayores a 30 °C. Colombia: Universidad Antonio Nariño.
- Zajch, A., & Gough, W. (2021). Seasonal sensitivity to atmospheric and ground surface temperature changes of an open earth-air heat exchanger in

Canadian climates. *Geothermics*, 89.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101914>