

Modelación numérica de dos Ensayos de Respuesta Térmica (TRT) utilizando el Método de Diferencias Finitas

Numerical modeling of two Thermal Response Test (TRT) using Finite Difference Method

Esteban Alberto Rangel-Serratos, Norma Patricia López-Acosta y David Francisco Barba-Galdámez
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

RESUMEN: El Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) es el procedimiento estándar en la industria geotérmica para determinar las propiedades térmicas requeridas para el dimensionamiento de pozos intercambiadores de calor (GSHP) y pilas de energía. Tradicionalmente, los TRTs se analizan a partir de modelos analíticos idealizados que asumen una fuente de calor constante. Sin embargo, estos métodos no permiten estudiar con precisión los cambios de temperatura que ocurren en el suelo. El presente artículo muestra la adaptación de un método basado en diferencias finitas para simular la transferencia de calor que ocurre en los GSHPs y las pilas de energía. Esta solución numérica, programada en Matlab®, fue empleada para modelar los resultados de dos TRTs ejecutados en México. Los buenos resultados obtenidos en ambos ensayos, demuestran que el método numérico implementado permite reproducir satisfactoriamente TRTs, constituyendo una valiosa herramienta para el análisis del comportamiento térmico de GSHPs y pilas de energía.

ABSTRACT: The Thermal Response Test (TRT) is the standard procedure in the geothermal industry to determine the thermal properties required for sizing Ground Source Heat Pumps (GSHP) and energy piles. Traditionally, TRTs are analyzed from idealized analytical models that assume a constant heat source. However, these methods do not allow to accurately study the temperature changes that occur in the soil. This article shows the adaptation of a method based on finite differences simulate the heat transfer that occurs in GSHPs and energy piles. This numerical solution, programmed in Matlab®, was used to model the results of two TRTs carried out in Mexico. The good results obtained in both TRTs demonstrate that the implemented numerical method allows to satisfactorily reproduce TRTs, representing a valuable tool for the analysis of the thermal behavior of GSHPs and energy piles.

1 INTRODUCCIÓN

El rubro de las edificaciones constituye uno de los mayores consumidores de recursos naturales a nivel internacional, representando cerca del 32% del consumo total de energía y el 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero que ocasionan el cambio climático (Change, 2014; Menéndez *et al.*, 2018). En México, según la Secretaría de Energía (SENER), en 2018 los hidrocarburos aportaron el 82.87% de la producción de energía primaria provocando altos impactos ambientales gracias a la quema de combustibles fósiles (SENER, 2018).

La mayor parte de la energía total consumida en las edificaciones corresponde a los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*, HVAC por sus siglas en inglés), por lo que un mínimo aumento en su eficiencia operativa puede resultar en ahorros de energía significativos (Lu *et al.*, 2005). Al respecto, la superficie de la tierra contiene un gran potencial de energía geotérmica que puede aprovecharse para la calefacción y refrigeración de las edificaciones (Adam y Markiewicz, 2009). La energía geotérmica es una fuente de energía renovable, económica y respetuosa con el medio ambiente, independiente de los combustibles fósiles. Su aprovechamiento contribuye al cumplimiento de obligaciones internacionales referentes a la generación de energías limpias. Entre las tecnologías más prometedoras que permiten utilizar la energía geotérmica en sistemas

HVAC se encuentran las Bombas de Calor Geotérmica (BCG), en particular los sistemas cerrados denominados pozos intercambiadores de calor (*Ground Source Heat Pump*, GSHP por sus siglas en inglés) y las geoestructuras termoactivas.

Las BCG son máquinas capaces de aprovechar la diferencia de temperatura entre el suelo y el ambiente para la calefacción o enfriamiento de edificios. Las BCG de sistema cerrado consisten en una serie de tuberías en bucle (en forma de U, W o helicoidal), por las que circula un fluido (generalmente agua) que se encarga de realizar el intercambio térmico entre la superficie y el subsuelo. En los meses más fríos, el sistema extrae el calor del suelo para calentar la edificación, mientras que, en los meses cálidos se inyecta calor al suelo para permitir que la edificación se enfríe (Li y Lai, 2015). En el caso de los GSHPs, las tuberías se instalan en pozos perforados específicamente para funcionar como intercambiadores de calor. Mientras que, en las geoestructuras termoactivas las tuberías se alojan dentro de los elementos de cimentación de la edificación (pilas, muros diafragma, losas, etc.), permitiendo reducir los costos de instalación (Brandl, 2016).

El dimensionamiento y la estimación de la energía provista por los GSHPs y las estructuras termoactivas requieren la correcta determinación de ciertas propiedades térmicas, como la conductividad térmica del suelo λ , su temperatura inalterada y la resistencia térmica del

intercambiador de calor R_b (Gehlin, 2002). El procedimiento estándar en la industria geotérmica para medir estos parámetros en campo es el Ensayo de Respuesta Térmica (*Thermal Response Test*, TRT por sus siglas en inglés). El TRT consiste en hacer circular un fluido portador de calor dentro de una tubería en bucle incrustada en el suelo. Durante el periodo de prueba se monitorean las temperaturas de entrada y salida del circuito. Este ensayo permite obtener valores efectivos de las propiedades térmicas en condiciones reales de campo, eliminando los problemas de extracción, transporte y manejo de muestras inalteradas asociadas a pruebas de laboratorio (Low *et al.*, 2015). Tradicionalmente, los resultados de los TRTs se analizan a partir de modelos analíticos idealizados que asumen una fuente de calor constante a lo largo de la longitud del intercambiador de calor (GSHP o pila de energía). Sin embargo, estos métodos no permiten estudiar con precisión los cambios de temperatura que ocurren en el suelo durante el desarrollo del ensayo.

El presente artículo muestra la adaptación de un método de análisis basado en diferencias finitas para solucionar las ecuaciones diferenciales parciales que describen el proceso de transferencia de calor que ocurre en los GSHPs y las pilas de energía. Esta solución numérica, programada en Matlab®, fue aplicada para simular los resultados de dos Ensayos de Respuesta Térmica (TRT) realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en diferentes zonas del Valle de México, uno ejecutado en un GSHP y el otro realizado en una pila de energía. El objetivo primordial es validar el modelo numérico implementado a través de los datos experimentales obtenidos en campo, de tal manera que este modelo sirva como una herramienta para el estudio del comportamiento térmico de GSHPs y pilas de energía.

2 SOLUCIONES ANALÍTICAS Y NUMÉRICAS: VENTAJAS Y LIMITACIONES

Las hipótesis utilizadas para resolver analíticamente las ecuaciones diferenciales que describen el proceso de transferencia de calor en los GSHPs y las geoestructuras termoactivas limitan su aplicabilidad a casos muy sencillos, que difieren de condiciones típicas de campo (Lamarche, Kaji, y Beauchamp, 2010). En este sentido, los modelos analíticos no permiten simular la variación espacial y temporal de las propiedades térmicas de los suelos, la variación de la temperatura ambiente a lo largo del año, la presencia de flujo de agua en un estrato particular de suelo, geometrías no circulares del intercambiador de calor, entre otras. Por otra parte, las soluciones analíticas tradicionales resultan inadecuadas para evaluar la respuesta térmica de GSHPs y geoestructuras termoactivas ante cambios rápidos de cargas térmicas debido a que no consideran explícitamente los cambios de temperatura dentro del intercambiador de calor ni en el fluido que circula en las tuberías (Laloui y Rotta Loria, 2020). Pese a que en años recientes se han propuesto nuevos modelos analíticos en la literatura internacional para solucionar estas limitaciones (Diao *et al.*, 2004; Molina-Giraldo *et al.*, 2011; Li y Lai, 2013; Abdelaziz *et al.*, 2014), su aplicación requiere de conocimientos matemáticos especializados, lo que dificulta su implementación en la práctica profesional.

Por otra parte, los modelos numéricos (p. ej., el método de elementos finitos y el método de diferencias finitas) son lo suficientemente versátiles para describir de manera realista todos los mecanismos físicos presentes en los GSHPs y en las estructuras termoactivas. No obstante, en algunas ocasiones puede resultar poco práctico aplicarlos por las siguientes razones: 1) consumen mayor tiempo de cálculo y requieren equipo de cómputo más potente, particularmente en las simulaciones donde es importante considerar todas las escalas de tiempo y espacio, 2) el desarrollo de software para el análisis, diseño y simulación de los GSHPs y las estructuras termoactivas implica una programación complicada, debido a que la red de varias configuraciones de Intercambiadores de Calor Geotérmicos es muy grande y compleja, 3) comúnmente la mayoría de los modelos numéricos se implementan en softwares comerciales que pueden ser difíciles de utilizar para diseñadores e ingenieros de la práctica profesional.

Con el objetivo de resolver estas limitaciones, Ghasemi-Fare y Basu (2013) propusieron una solución numérica basada en el método de diferencias finitas para resolver simultáneamente el sistema de ecuaciones diferenciales parciales que describe el fenómeno de flujo de calor desde el fluido dentro de las tuberías del intercambiador de calor hasta el suelo. El modelo numérico propuesto permite capturar los efectos de diferentes variables de diseño, operativas y específicas del sitio sobre la variación de la temperatura del suelo en función del tiempo (Ghasemi-Fare y Basu, 2013). En comparación con otras soluciones numéricas, la propuesta de Ghasemi-Fare y Basu (2013) es una técnica relativamente simple que puede implementarse fácilmente en hojas de cálculo. A continuación, se detallan los fundamentos teóricos del modelo y los requerimientos para su aplicación a problemas de GSHPs y pilas de energía.

3 MODELO NUMÉRICO APLICADO EN ESTA INVESTIGACIÓN

3.1 Desarrollo del modelo numérico

El modelo numérico propuesto por Ghasemi-Fare y Basu (2013) considera un sistema axisimétrico constituido por un intercambiador de calor (GSHP o pila de energía) con una tubería en su interior en forma de U (Figura 1a). En el modelo se consideran las siguientes hipótesis: 1) el diámetro del tubo de circulación es dos órdenes de magnitud más pequeño que la zona de influencia térmica esperada alrededor de la pila, 2) la interacción entre los dos tubos verticales del arreglo en U es despreciable, y 3) el espesor de las paredes del tubo es nulo. La transferencia de calor del fluido al medio circundante se analiza acoplando las ecuaciones de conducción de calor y de balance de calor (Ghasemi-Fare y Basu, 2013). Así, la evolución de la temperatura respecto al tiempo $T(r, z, t)$ debido a la conducción de calor dentro de un dominio simétrico se puede expresar como:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_{ce}} \quad (2)$$

donde a , λ , ρ y c_{ce} son la difusividad térmica, la conductividad térmica, la densidad y la capacidad calorífica específica

del medio de conducción de calor, respectivamente, y t es el tiempo. La distancia radial r y la profundidad z se miden desde el origen O (Figura 1b).

La Ec. 1 no permite describir la transferencia de calor dentro del intercambiador de calor (GSHP o pila de energía) porque no contempla el flujo de calor dentro del tubo de circulación. Para simular lo anterior, se considera un elemento diferencial A (Figura 1a) dentro del tubo de circulación cuya temperatura aumenta una cantidad dT en un tiempo dt . Asumiendo una tasa de transferencia de calor promedio q del elemento A al intercambiador de calor (GSHP o pila de energía) sobre la longitud dz , la ecuación de balance de calor para el elemento A queda definida como:

$$\dot{m}c_{cef}dT^e = qdz + \rho_f \pi r_t^2 dz c_{cef} dT \quad (3)$$

donde dT^e es la diferencia de temperatura alrededor de la longitud dz entre la parte superior e inferior del elemento A , \dot{m} es el caudal másico, c_{cef} es la capacidad calorífica específica del fluido dentro del tubo, y r_t es el radio del tubo de circulación. La Ec. 3 desprecia la variación radial de la temperatura del fluido con la profundidad. La tasa de transferencia de calor por unidad de área superficial \dot{q} queda definida como:

$$q = \dot{q}dA \quad (4)$$

donde dA es el área de la superficie disponible para la transferencia de calor del elemento A al intercambiador de

calor (GSHP o pila de energía). Por otra parte, el valor de \dot{q} está definido por:

$$\dot{q}(z, t) = -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5)$$

donde λ_c es la conductividad térmica del relleno (usualmente concreto). Utilizando la definición de tasa de transferencia de masa (flujo) \dot{m} y sustituyendo las Ecs. 4 y 5 en la Ec. 3, la ecuación de balance de calor se puede escribir como:

$$\rho_f v \pi r_t^2 c_{cef} dt dT^e = \rho_f \pi r_t^2 c_{cef} dz dT - 2\lambda_c \pi r_t dz dt \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (6)$$

donde ρ_f es la densidad y v es la velocidad del fluido de circulación. Reordenando la Ec. 6 se obtiene la ecuación diferencial parcial del transporte de calor a través del fluido que circula dentro de las tuberías en la pila de energía:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = v \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{2\lambda_c}{\rho_f c_{cef} r_t} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (7)$$

La solución de las Ecs. 1 y 7 simultáneamente bajo diferentes condiciones iniciales y de frontera proporciona la evolución de la temperatura dependiente del tiempo debido a la conducción de calor dentro del intercambiador de calor (GSHP o pila de energía) y en el suelo que la rodea (Ghasemi-Fare y Basu, 2013).

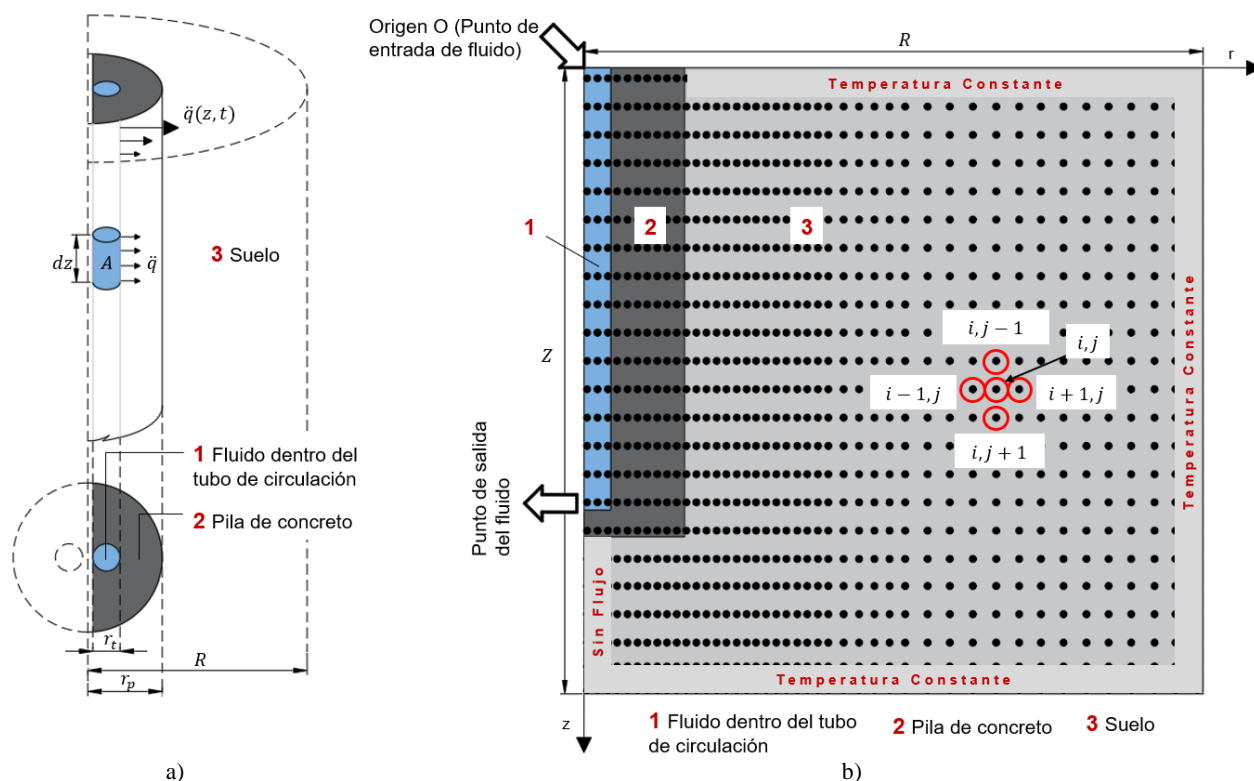


Figura 1. Dominio del modelo numérico, a) vista isométrica y en planta y b) cuadrícula de diferencias finitas y condiciones de frontera (Ghasemi-Fare y Basu, 2013). Nota: r_p = radio de la pila, R = radio total del medio simulado, Z = profundidad total del medio.

$$T_{i,j}^{t+1} = T_{i,j}^t + a\Delta t \left[\left(\frac{T_{i-1,j}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i+1,j}^t}{\Delta r_i \Delta r_{i+1}} \right) + \frac{1}{r_i} \frac{(T_{i+1,j}^t - T_{i,j}^t)}{\Delta r_{i+1}} + \left(\frac{T_{i,j-1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j+1}^t}{\Delta z_i \Delta z_{i+1}} \right) \right] \quad (8)$$

$$T_{i,j}^{t+1} = T_{i,j}^t + v \frac{\Delta t}{\Delta z_j} (T_{i,j-1}^t - T_{i,j}^t) + \frac{2\lambda_c \Delta t}{\rho_f c_{cef} r_i \Delta r_i} (T_{i+1,j}^t - T_{i,j}^t) \quad (9)$$

$$T^{t+1} = T^t + \frac{\Delta t (r_{i+1}^2 - r_{i-1}^2)}{(r_i^2 - r_{i-1}^2) \rho_c c_{cec} + (r_{i+1}^2 - r_i^2) \rho_s c_{ces}} \left\{ \frac{1}{r_i} \left[\frac{\lambda_s r_{i+1} \left(\frac{T_{i+2}^t - T_{i+1}^t}{r_{i+2} - r_{i+1}} \right) - \lambda_c r_{i-1} \left(\frac{T_{i-1}^t - T_{i-2}^t}{r_{i-1} - r_{i-2}} \right)}{(r_{i+1} - r_{i-1})} \right] + \frac{(r_{i+1}^2 - r_i^2)}{(r_{i+1}^2 - r_{i-1}^2)} \lambda_s \times \left(\frac{T_{i,j-1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j+1}^t}{\Delta z_i \Delta z_{i+1}} \right) + \frac{(r_i^2 - r_{i-1}^2)}{(r_{i+1}^2 - r_{i-1}^2)} \lambda_c \times \left(\frac{T_{i,j-1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j+1}^t}{\Delta z_i \Delta z_{i+1}} \right) \right\} \quad (10)$$

3.2 Ecuaciones del modelo numérico

Para la solución de ecuaciones diferenciales con el método de diferencias finitas, el medio continuo se discretiza en una cuadrícula en la que cada intersección representa un nodo. Así, usando series de Taylor en las Ecs. 1 y 7, es posible obtener una ecuación para la temperatura T en un nodo (i,j) para un tiempo $t+\Delta t$ en función de la temperatura en los nodos adyacentes en un tiempo t (Ecs. 8 y 9). Estas expresiones son similares a las utilizadas en el método de sobre-relajaciones sucesivas (*SOR, Successive Over-Relaxation method*) para resolver problemas de flujo de agua en suelos (López-Acosta y González-Acosta, 2015).

En la interfaz concreto-suelo ($r = r_p$) se considera la continuidad de flujo de calor mediante la Ec. 10. Esta expresión es necesaria para obtener una solución realista de la transferencia de calor, ya que los valores de difusividad térmica del relleno (usualmente concreto) y el suelo difieren significativamente en la mayoría de los casos (Ghasemi-Fare y Basu, 2013).

En términos generales, la Ec. 8 permite representar la transferencia de calor entre un mismo material, es decir entre una partícula de concreto a otra de concreto o de una partícula de suelo a otra de suelo. Por otro lado, la Ec. 9 permite representar la transferencia de calor dentro de la tubería, ya que considera parámetros como la velocidad de flujo v , la densidad del fluido en circulación ρ_f y la capacidad calorífica específica del fluido C_{cef} . Por último, la Ec. 10 permite representar la transferencia de calor de un material a otro, por ejemplo, entre una partícula de concreto a una de suelo, o viceversa. La estabilidad de las soluciones de diferencias finitas presentadas por Ghasemi-Fare y Basu (2013) se garantiza mediante la selección de un intervalo de tiempo Δt suficientemente pequeño para satisfacer la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (Courant, Friedrichs y Lewy, 1967). El criterio de estabilidad temporal se expresa como:

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{1}{\frac{2a}{\Delta r^2} + \frac{2a}{\Delta z^2} + \frac{2a}{r_i \Delta r}}, \frac{1}{\frac{v}{\Delta z} + \frac{\lambda_c}{\rho_f c_{cef} r_i \Delta r}} \right\} \quad (11)$$

Las condiciones de frontera requeridas en el modelo se muestran en la Figura 1b, mientras que las condiciones iniciales son:

$$T = T_{inicial} \text{ para } r = R, z \geq 0; r \geq 2r_t, z = 0 \text{ y } r \geq 0, z = Z \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ para } r = 0, z \geq 0 \quad (13)$$

$$T = T_{inicial} \text{ para } t = 0; 0 \leq r \leq R \text{ y } 0 \leq z \leq Z \quad (14)$$

4 REPRESENTACIÓN DE PRUEBAS DE RESPUESTA TÉRMICA (TRT) EN UN POZO GEOTÉRMICO Y EN UNA PILA DE ENERGÍA MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA

4.1 Generalidades de la prueba TRT realizada en un pozo geotérmico

Como parte de un programa de investigación de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) para la caracterización de las propiedades térmicas de los suelos nacionales, se llevó a cabo un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) en un campo experimental ubicado en Naucalpan, Estado de México. Las exploraciones geotécnicas efectuadas en la zona indican que la estratigrafía del sitio de estudio está compuesta por diferentes capas de arena limosa con limo y gravas (Rivera-Martínez, 2021).

Para la ejecución del ensayo se utilizó un equipo móvil recientemente diseñado, construido y habilitado por el IIUNAM, denominado equipo móvil TRT-IIUNAM (López-Acosta *et al.*, 2022). El TRT se efectuó en un pozo intercambiador de calor (GSHP) de 20 m de profundidad y 15 cm de diámetro, equipado con un bucle de tubería en U de Polietileno de Alta Densidad (PEAD). Adicionalmente, se excavó un pozo de observación de 20 metros de profundidad y 15 centímetros de diámetro ubicado a 65 centímetros de distancia del pozo intercambiador de calor (Figura 4). El pozo de observación fue instrumentado con 7 sensores de temperatura PT-100 ubicados a distintas profundidades (1.5, 3, 4.5, 6, 9, 13.5 y 18 m) con la finalidad de contar con más información de la transferencia de calor en el suelo circundante a la prueba (Figura 4). Ambos pozos

fueron rellenados con una mezcla de cemento, arena sílica y grafito amorfo, especialmente diseñada para el ensayo (Rivera-Martínez *et al.*, 2021).

La prueba TRT tuvo una duración de 6 días (aproximadamente 150 horas). Durante las primeras 80 h del ensayo (etapa de calentamiento) se inyectó calor al pozo intercambiador de calor a una tasa promedio de 65.4 W/m utilizando un calentador eléctrico. Posteriormente, se apagó el calentador y se registró durante 70 h la variación de temperatura del suelo mientras retornaba a su condición original (etapa de recuperación).



Figura 2. Equipo móvil TRT-IIUNAM, b) Pozo intercambiador de calor de prueba (izquierda) y pozo de observación instrumentado (derecha) (Rivera-Martínez, 2021).

4.2 Generalidades de la prueba TRT realizada en una pila de energía

De manera adicional a la prueba TRT descrita en el inciso anterior 4.1, en diciembre de 2020 el IIUNAM realizó otra prueba TRT en una pila de energía. La pila de energía forma parte del sistema de cimentación de un proyecto habitacional de vanguardia denominado “Residencia C73”, ubicado al poniente de la Ciudad de México (López-Acosta *et al.*, 2022). El proyecto “Residencia C73” constituye la primera edificación climatizada con geoestructuras termoactivas en México.

La pila de energía en la que se realizó la prueba TRT (Figura 3) tiene 0.8 m de diámetro, 15.5 m de longitud, y cuenta con cuatro bucles de tubería en U conectados en serie (Figura 3a). La prueba tuvo una duración total de 60 horas, contando únicamente con fase de calentamiento. El caudal hidráulico y la tasa de inyección de calor se mantuvieron aproximadamente constantes durante la prueba, con valores promedio de 0.557 m³/h y 1.704 kW, respectivamente. El suelo del sitio de estudio está constituido por arenas limosas y tobas cementadas (Rivera-Martínez, 2021).

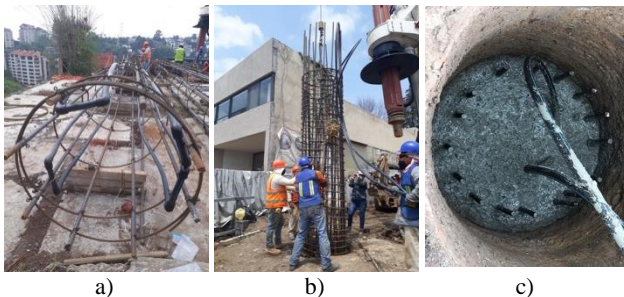


Figura 3. Pila de energía sometida a prueba TRT: a) Colocación de la tubería en el armado. b) Colocación del armado en el suelo. c) Pila de energía colada *in situ* con extremos de tubería en la cabeza de la pila.

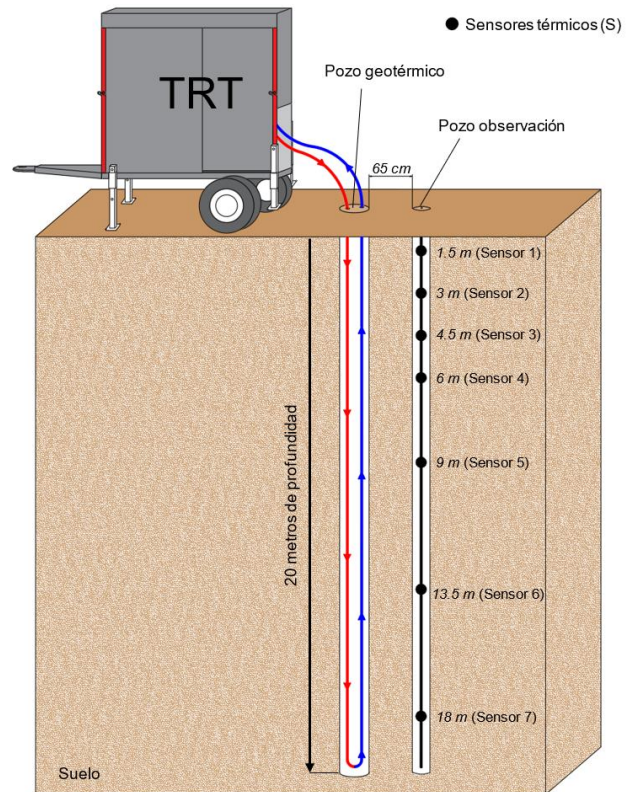


Figura 4. Esquema ilustrativo de la Prueba de Respuesta Térmica (TRT) en un pozo intercambiador de calor.

4.3 Modelación numérica de las pruebas TRT realizadas

Una vez ejecutadas las pruebas TRT anteriormente descritas, y concluida la programación del modelo numérico objeto de esta investigación, se llevó a cabo la validación de los datos experimentales de las pruebas realizadas *in situ*. Lo anterior mediante la comparación de los datos recopilados en campo y los datos obtenidos del modelo numérico programado. En la Tabla 1 se pueden consultar los parámetros y propiedades térmicas utilizados para la modelación del pozo intercambiador de calor, la pila de energía y el suelo en las diferentes pruebas TRTs realizadas.

Como se puede observar en la gráfica de la Figura 5, los resultados obtenidos con la modelación numérica se ajustan de forma muy adecuada a los valores de la temperatura de salida registrados en la prueba TRT efectuada en el pozo intercambiador de calor (GSHP). El modelo permite representar adecuadamente la variación en la temperatura del fluido de salida tanto para la *fase de calentamiento* como para la *fase de enfriamiento* de la prueba. En la Figura 5 se distingue el cambio brusco de temperatura aproximadamente a las 80 h del ensayo, provocado por el apagado del calentador, dando inicio a la *fase de recuperación* o *enfriamiento*. Las máximas diferencias entre la temperatura medida y modelada fueron 0.380°C para la fase de calentamiento y 0.172°C para la de recuperación, lo que representa errores mínimos de 0.73% y 0.59%, respectivamente.

Tabla 1. Parámetros y propiedades térmicas del pozo geotérmico y de la pila de energía, así como las propiedades térmicas de los suelos correspondientes, utilizadas en la modelación numérica de cada prueba TRT.

Parámetro	a) Prueba en un pozo geotérmico		b) Prueba en una pila de energía	
	Relleno del pozo de prueba	Suelo	Pila de energía	Suelo
Difusividad térmica a (m ² /s)	1.4×10^{-7}	5.21×10^{-7}	0.66×10^{-6}	1.4×10^{-6}
Conductividad térmica λ (W/m°C)	1.722	0.822	1.6	1.633
Densidad ρ (kg/m ³)	1950	1440	2400	1440
Radio de tubería r_i (m)	0.02	---	0.02	---
Velocidad de flujo en tubería v (m/s)	0.2387	---	0.03075	---
Capacidad calorífica específica C_{cc} (J/kg°C)	1700	1824	670	1700
Longitud del pozo H (m)	20	---	15.5	---
Diámetro del pozo r_p (m)	0.15	---	0.4	---

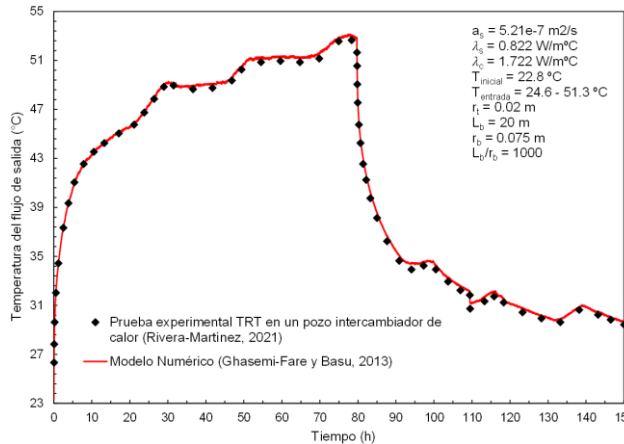


Figura 5. Resultados de temperaturas de salida registradas por prueba TRT en un pozo intercambiador de calor (GSHP) y calculados mediante el modelo numérico desarrollado.

Adicionalmente, con el objeto de validar la correcta reproducción de la transferencia de calor en el terreno, se compararon las temperaturas medidas experimentalmente en el sensor 5 (localizado a 9 m de profundidad) del pozo de observación que está a 65 centímetros de separación del pozo de prueba con los resultados obtenidos en la modelación numérica. Se decidió utilizar este sensor 5, debido a que se encuentra a una profundidad cercana al centro de la longitud total del pozo intercambiador de calor (GSHP). La Figura 6 muestra que, al igual que con la temperatura salida, el modelo numérico es capaz de representar satisfactoriamente los cambios de temperatura en el suelo ocasionados por la inyección de calor durante la etapa de calentamiento del TRT. En este caso, la máxima diferencia entre la temperatura medida y la modelada fue de 0.416 °C, lo que representa un error de 1.69%.

Por otra parte, como se puede observar en la gráfica de la Figura 7 los resultados obtenidos con el modelo numérico también se ajustan de forma adecuada a los valores de temperatura de salida registrados en la prueba de respuesta térmica TRT ejecutada en la pila de energía. En este caso, la máxima diferencia entre la temperatura medida y la modelada fue de 0.516 °C, que representa un error de 2.09%.

Los resultados anteriores, muestran que el modelo numérico implementado en esta investigación es capaz de reproducir adecuadamente el fenómeno térmico presente en una pila de energía o en un pozo intercambiador de calor (GSHP).

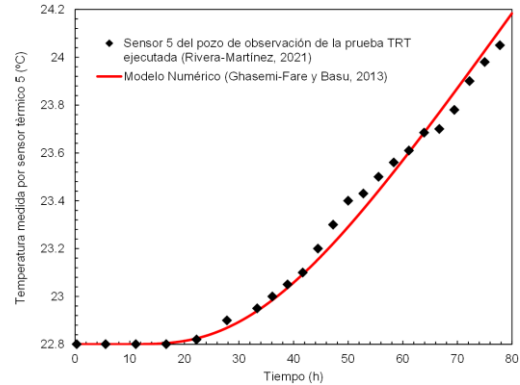


Figura 6. Gráfica de temperaturas medidas experimentalmente en el Sensor 5 del pozo de observación y las temperaturas obtenidas con el modelo numérico implementado para representar la prueba TRT en el pozo intercambiador de calor (GSHP).

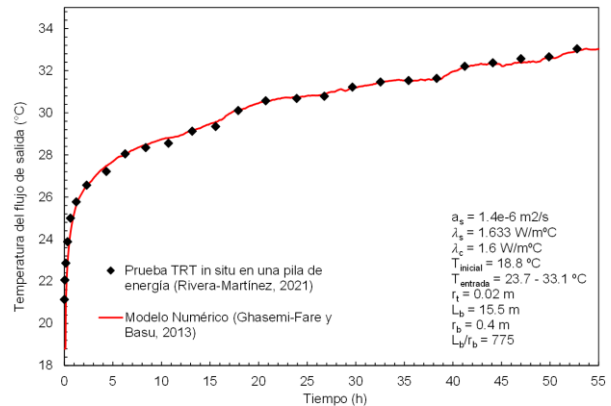


Figura 7. Resultados de temperaturas de salida medidas en la prueba TRT en la pila de energía y temperaturas de salida calculadas con el modelo numérico implementado.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA DE PRUEBAS TRT EN UN POZO INTERCAMBIADOR DE CALOR Y EN UNA PILA DE ENERGÍA

5.1 Campos térmicos o mapas de isovalores de temperatura

Además de reproducir las temperaturas de salida del fluido en Ensayos de Respuesta Térmica (TRT), el modelo

numérico permite representar mediante mapas de isovalores de temperatura la transferencia de calor o distribución de temperatura en el suelo alrededor del pozo intercambiador de calor (Figura 8a) o de la pila de energía (Figura 8b) ensayados. Los mapas de isovalores mostrados en la Figura 8 se realizaron con ayuda del software SURFER 3D®, considerando distintos intervalos de tiempo de interés.

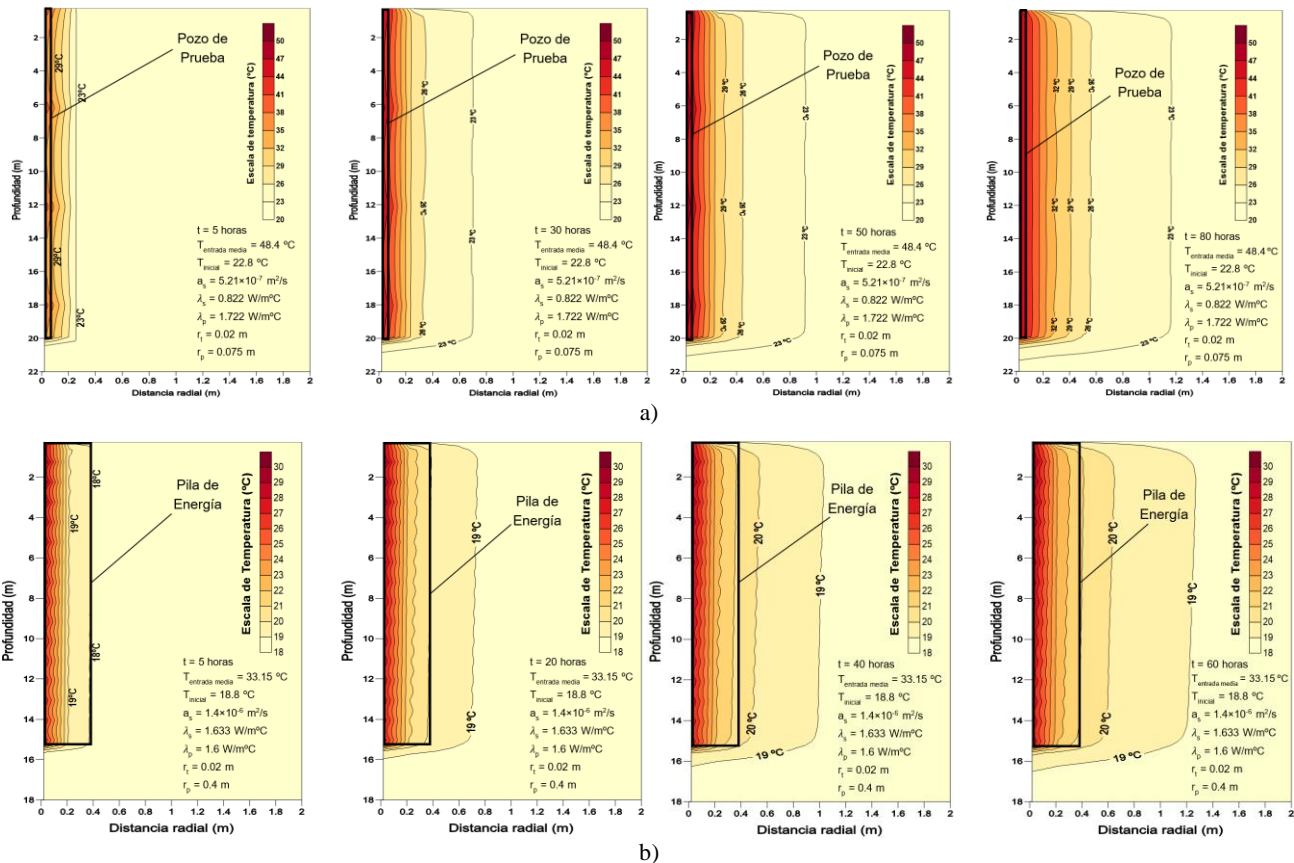
En general, se observa que en ambos casos la temperatura en el suelo aumenta progresivamente con el tiempo. Comparando la Figura 8a y la Figura 8b, se distingue que el calor se transfirió más lentamente al suelo en la prueba desarrollada en el pozo intercambiador de calor (GSHP) que en la ejecutada en la pila de energía. Así, para que los efectos de la inyección de calor se perciban a 1.2 m de la fuente se requirieron de 80 h en el primer ensayo (efectuado en el pozo intercambiador de calor) (Figura 8a), por las 60 horas requeridas en el segundo ensayo (efectuado en la pila de energía) (Figura 8b). Lo anterior puede deberse a que el suelo del sitio donde se localiza la pila de energía ensayada tiene un valor de conductividad térmica (1.633

W/m°C) mucho mayor que el valor de conductividad térmica del suelo en donde se ubica el pozo intercambiador de calor (GSHP) ensayado (0.822 W/m°C).

5.2 Efecto de distintas conductividades y difusividades térmicas en el suelo

Adicionalmente, se realizaron análisis paramétricos para evaluar el efecto que tienen distintos valores de conductividad y difusividad térmica del suelo en los resultados de una prueba TRT. Estos cálculos se realizaron utilizando el modelo numérico correspondiente a la prueba TRT en el pozo intercambiador de calor (GSHP), debido a que esta prueba no cuenta con concreto entre la tubería y el suelo.

El punto donde se realizan los cálculos corresponde a una profundidad de 10 metros (mitad de la longitud total del pozo intercambiador de calor), y a una distancia radial de 10 centímetros de la fuente de calor (que es la tubería).



Nota: t es el tiempo transcurrido en horas después de iniciada la prueba, $T_{entrada}$ media es la temperatura de entrada media del fluido en la tubería durante toda la prueba, $T_{inicial}$ es la temperatura inicial a la que se encontraba el medio antes del inicio de la prueba, α_s y λ_s son la difusividad térmica y la conductividad térmica del suelo, respectivamente, λ_p es la conductividad térmica del relleno del pozo de prueba para la prueba en un pozo geotérmico y la conductividad térmica del concreto para la prueba en una pila de energía, r_t es el radio de la tubería y r_p es el radio del pozo de prueba para la prueba en un pozo geotérmico y el radio de la pila de energía para la prueba ejecutada en una estructura de concreto.

Figura 8. Campos térmicos o mapas de isovalores. a) Distribución de temperatura en el suelo alrededor del pozo intercambiador de calor ensayado. b) Distribución de temperatura en el suelo alrededor de la pila de energía ensayada.

Cabe mencionar que, en cada análisis realizado se asumieron las mismas temperaturas de entrada a la tubería, tanto para los cálculos donde se varió la conductividad térmica, como para los cálculos donde se varió la difusividad térmica.

En un primer análisis paramétrico la conductividad térmica del suelo variable fue 0.2, 1, 2.5 y 5 W/m°C (Figura 9a). En un segundo análisis paramétrico la difusividad térmica variable fue 1×10^{-8} , 1×10^{-7} , 1×10^{-6} y 1×10^{-5} m²/s (Figura 9b).

En la Figura 9a se observa que, a medida que la conductividad térmica de un suelo aumenta, su capacidad de transferencia de calor se incrementa. No obstante, con el transcurso del tiempo, también aumenta significativamente la temperatura de salida del fluido (Rangel-Serratos, 2022). Por otro lado, el segundo análisis paramétrico (Figura 9b) indica que la influencia de la difusividad térmica en el comportamiento de un TRT es mayor con respecto a la de la conductividad térmica. Así, a mayor difusividad térmica, el suelo responde más rápido a la inyección de calor provocada por la fuente (que en este caso es la tubería en el pozo intercambiador de calor). Adicionalmente, se distingue que el suelo con el valor de difusividad térmica más bajo (1×10^{-8} m²/s) apenas comienza a reaccionar a 30 horas de iniciada la inyección de calor, mientras que, en el suelo con un valor de difusividad térmica alto (1×10^{-5} m²/s) los cambios de temperatura se perciben desde los primeros minutos de iniciada la prueba. Por lo anterior, en proyectos donde disipar el calor a través del suelo sea fundamental, se deben considerar suelos con valores de difusividad térmica altos.

6 CONCLUSIONES

En años recientes, los pozos intercambiadores de calor (GSHP) y las estructuras termoactivas se han propuesto como una alternativa para reducir el impacto ambiental de la creciente demanda de energía para el acondicionamiento de espacios en el país. El diseño eficiente de estos sistemas requiere de la correcta determinación de propiedades térmicas de los suelos y de los intercambiadores de calor

(GSHPs o pilas de energía). En la industria geotérmica, dichos parámetros suelen medirse en campo a través del Ensayo de Respuesta Térmica (TRT). Este tipo de ensayos se interpretan regularmente utilizando modelos analíticos idealizados que no son capaces de representar adecuadamente condiciones de campo complejas (p. ej., variación espacial y temporal de las propiedades térmicas de los suelos, la variación a lo largo del año de la temperatura ambiente o la presencia de flujo de agua), ni permiten estudiar con precisión los cambios de temperatura que ocurren en el suelo durante el desarrollo del ensayo.

En el presente artículo se expuso la adaptación de un método de análisis basado en diferencias finitas para solucionar las ecuaciones diferenciales parciales que describen el proceso de transferencia de calor que ocurre durante el funcionamiento de los GSHPs y las pilas de energía. Esta solución numérica, programada en Matlab®, permite describir los mecanismos de flujo de calor desde el fluido dentro de las tuberías del intercambiador de calor (GSHP o pilas de energía).

Con el objeto de validar la aplicabilidad del modelo numérico, se simuló los resultados de dos Ensayos de Respuesta Térmica (TRTs) recientemente ejecutados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en diferentes zonas del Valle de México. Uno de los ensayos fue desarrollado en un pozo intercambiador de calor (GSHP) y el otro, en una pila de energía. Los resultados indican que el modelo implementado permite reproducir satisfactoriamente los datos experimentales de ambos ensayos, así como la transferencia de calor en el suelo que circunda al intercambiador en el ensayo ejecutado en un GSHP.

Finalmente, verificada la capacidad del método numérico para modelar el funcionamiento de GSHPs y pilas de energía, se ejecutaron análisis paramétricos para estudiar el efecto de las propiedades térmicas del suelo (conductividad térmica y difusividad térmica) en el comportamiento de un Ensayo de Respuesta Térmica. A partir de estos análisis, se comprobó que, a mayor conductividad y difusividad térmica del suelo, la capacidad de transferir calor del sistema geotérmico (GSHP o pila de energía) aumenta.

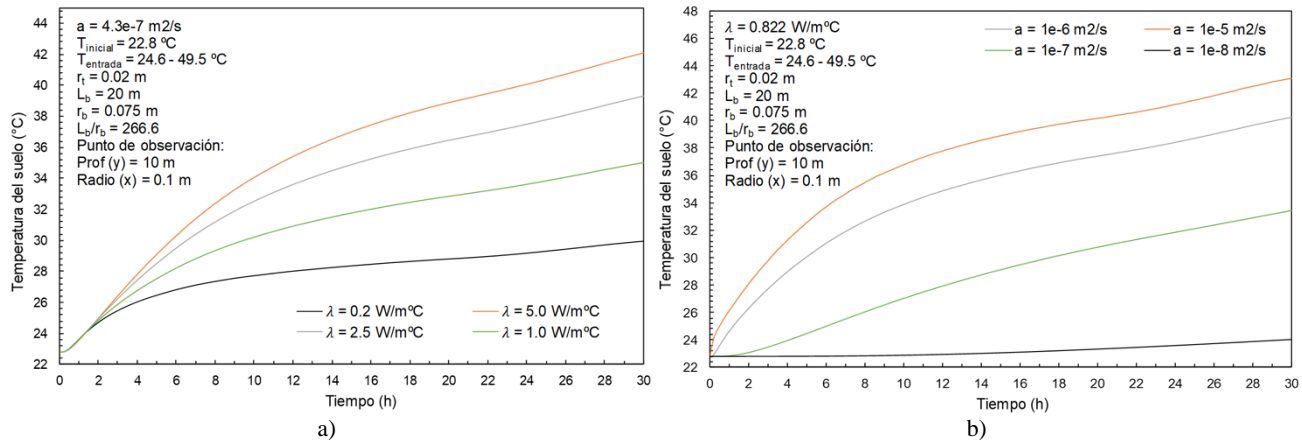


Figura 9. Variación de la temperatura del suelo en función del tiempo para distintas: a) conductividades térmicas, b) difusividades térmicas.

Los resultados presentados indican que el modelo numérico implementado es una herramienta práctica, eficiente, y de fácil aplicación para estudiar el comportamiento térmico de GSHPs y pilas de energía.

A partir de los resultados es posible dar dos recomendaciones generales para futuras investigaciones. La primera, consiste en extender las modelaciones numéricas aquí efectuadas, mediante análisis paramétricos adicionales en los que se pueda observar la influencia de cada una de las propiedades térmicas del suelo en la transferencia de calor en los mismos debido a la presencia de estructuras termoactivas como las pilas de energía. Y la segunda, en desarrollar modelos numéricos adicionales que permitan estudiar a largo plazo la interacción térmica entre varias estructuras intercambiadoras de calor o pilas de energía en el suelo.

REFERENCIAS

- Abuel-Naga, H., Raouf, a. M. I., Raouf, M. I. N., y Nasser, A. G. (2015). "Energy piles: current state of knowledge and design challenges". *Environmental Geotechnics*, 2(4), 195-210.
- Adam, D., y Markiewicz, R. (2009). "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers". *Géotechnique*, 59(3), 229-236.
- Spitler, J. D., y Bernier, M. (2016). "Vertical borehole ground heat exchanger design methods". En: Rees, S. (Ed.) *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead Publishing.
- Brandl, H. (2006). "Energy foundations and other thermo-active ground structures". *Géotechnique*, 56(2), 81-122.
- Carslaw, H.S., y Jaeger, J.C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Oxford Clarendon Press, Oxford, Reino Unido.
- Change, I. C. (2014). "Mitigation of climate change". *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1454.
- Courant, R., Friedrichs, K., y Lewy, H. (1967). "On the partial difference equations of mathematical physics". *IBM journal of Research and Development*, 11(2), 215-234.
- Diao, N., Li, Q., y Fang, Z. (2004). "Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection". *International Journal of Thermal Sciences*, 43(12), 1203-1211.
- Ghasemi-Fare, O., y Basu, P. (2013). "A practical heat transfer model for geothermal piles". *Energy and Buildings*, 66, 470-479.
- Lamarche, L., Kajl, S., y Beauchamp, B. (2010). "A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems". *Geothermics*, 39(2), 187-200.
- Li, M., y Lai, A. C. (2015). "Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales". *Applied Energy*, 151, 178-191.
- Lopez-Acosta, N.P., y González-Acosta, J.L. (2015). "Study of Water Flow in Dams using Successive Over-Relaxation". *Tecnologías y Ciencias del Agua*, 5(6), 43-58.
- López-Acosta, N.P., Barba-Galdámez, D.F., y Sánchez, M. (2017). "Pilas de energía. Explotación de recursos geotérmicos a través de las cimentaciones profundas". En: López-Acosta, N.P. (ed.) 4º Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas, CDMX, México, 149-162.
- López-Acosta, N.P., Rivera-Martínez, A.M. y Barba-Galdámez, D.F. (2022). "First Thermal Response Test (TRT) for energy geo-structure application in Mexico". *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Sydney.
- Low, J.E., Loveridge, F.A., Powrie, W., y Nicholson, D. (2015). "A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications". *Acta Geotechnica*, 10, 209-218.
- Lu, L., Cai, W., Xie, L., Li, S., y Soh, Y. C. (2005). "HVAC system optimization—in-building section". *Energy and Buildings*, 37(1), 11-22.
- Lund, J. W., Freeston, D.H. y Boyd, T. L. (2011). "Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review". *Geothermics*, 40, 159-180.
- Menéndez, K. H., Escamilla, A. C., Barrio, M. I. P., y Pérez, I. M. (2018). "Influencia de los ciclos térmicos en el comportamiento mecánico del hormigón de estructuras termoactivadas". *DYNA*, 93(2), 186-191.
- Molina-Giraldo, N., Blum, P., Zhu, K., Bayer, P., y Fang, Z. (2011). "A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection". *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 2506-2513.
- Rangel-Serratos, E. A. (2022). "Validación de datos experimentales de dos pruebas de respuesta térmica in situ, mediante modelación numérica". *Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería de la UNAM*.
- Rivera-Martínez, A.M. (2021). "Diseño e implementación de un equipo de respuesta térmica (TRT) para la determinación de las propiedades térmicas de los suelos". (Tesis de Maestría) *Universidad Nacional Autónoma de México. México*.
- Rivera-Martínez, A.M., López-Acosta, N.P. y Barba-Galdámez, D.F. (2021) "Estudio de diferentes mezclas para rellenos en ensayos de respuesta térmica (TRT)". *XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, Plataforma Online.
- Secretaría de Energía (SENER). (2018). Balance nacional de energía 2018. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia>.
- Zeng, H.Z., Diao, N.R., y Fang, Z.H. (2002). "A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers". *Heat Transfer-Asian Research*, 31(7), 558-567.