

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO MÓVIL TRT PARA LA DETERMINACIÓN *IN SITU* DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS SUELOS EN MÉXICO

NORMA PATRICIA LÓPEZ-ACOSTA,
ABIGAIL MARISOL RIVERA-MARTÍNEZ,
Y DAVID FRANCISCO BARBA-GALDÁMEZ

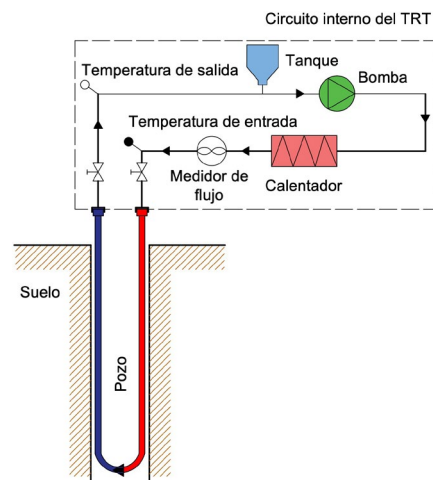
Los pozos intercambiadores de calor (*Ground Source Heat Pump, GSHP*) y las estructuras termoactivas (como pilas de energía, muros de energía, losas de energía, entre otras) utilizan la diferencia de temperatura entre el suelo y el ambiente para el calentamiento o enfriamiento de edificios, por lo cual representan una alternativa para reducir el impacto ambiental de la creciente demanda de energía para el acondicionamiento de espacios (Brandl, 2006). El diseño de estas estructuras requiere la correcta determinación de las propiedades térmicas del suelo, como la conductividad térmica λ ,

su temperatura inalterada y la resistencia térmica del intercambiador de calor R_b (Gehlin, 2002). Estas propiedades pueden obtenerse mediante pruebas de laboratorio o ensayos *in situ*. El procedimiento estándar para medir estos parámetros *in situ* es el ensayo de respuesta térmica (*Thermal Response Test, TRT*), el cual, permite obtener valores efectivos de las propiedades térmicas en condiciones reales de campo, eliminando los problemas de extracción, transporte y manejo de muestras inalteradas, asociados a las pruebas de laboratorio. En este trabajo se exponen las principales características de un aparato TRT móvil diseñado y puesto en marcha en el Instituto de Ingeniería, así como los resultados de las primeras pruebas ejecutadas dentro de la zona metropolitana del Valle de México.

El ensayo 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. Posteriormente, los datos medidos se ajustan a un modelo de transferencia de calor, como el modelo de fuente lineal infinita (Ingersoll y Plass, 1948) o el modelo transitorio de Loveridge *et al.* (2014). En 2020, como parte de un proyecto de investigación a cargo de la Dra. Norma Patricia López Acosta del Instituto de Ingeniería, se diseñó, construyó e implementó un equipo móvil que contiene todos los elementos necesarios para la ejecución de ensayos TRT (Fig.1).



a)



b)

Figura 1. a) Equipo TRT-IUNAM, b) Esquema representativo del circuito interno de funcionamiento

Las actividades generales para llevar a cabo una prueba de respuesta térmica se indican en la Figura 2 (para mayor información, consultar Rivera-Martínez, 2021).

El buen funcionamiento del equipo móvil TRT-IIUNAM se comprobó mediante la ejecución exitosa de dos pruebas en campo. La primera prueba TRT se efectuó al poniente de la CDMX en la primera pila de energía construida en el país de

80 cm de diámetro y 15.5 m de longitud. La segunda prueba TRT se realizó en un pozo en el subsuelo del norponiente del Estado de México, de 15 cm de diámetro y 20 metros de profundidad. La ubicación de los sitios de prueba se ilustra en la Figura 3. Las zonas de estudio se seleccionaron con base en la disponibilidad de espacio y las características estratigráficas del sitio.



a) Llegada del equipo a la obra



b) Ubicación del equipo en el sitio de prueba



c) Revisión de los componentes internos



d) Corte de la tubería y colocación del aislante térmico



e) Medición de la temperatura media del suelo con un sensor Pt 100



f) Conexión de las tuberías al equipo TRT-IIUNAM



g) Arranque del circuito interno de funcionamiento



h) Puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM



i) Monitoreo de la prueba

Figura 2. Actividades para la realización de un ensayo TRT

TRT ejecutado en una pila de energía

La estratigrafía de la zona de estudio está compuesta principalmente por arenas limosas con grava y fragmentos de roca andesítica. En la Tabla 1 se presentan las características principales de la prueba efectuada en una pila de energía (ubicación en la Figura 3).

Tabla 1. Características principales de la prueba ejecutada en una pila de energía

Diámetro	0.80 m
Longitud	15.5 m
No. Bucles	4
Duración de la prueba	60 horas
Método de análisis	Funciones G (Loveridge <i>et al.</i> , 2014)

La Figura 4a presenta las temperaturas de entrada y de salida registradas en la prueba. Durante el TRT se recomienda que el flujo de agua sea turbulento y que tanto el caudal como la potencia suministrada al sistema sean constantes, como se obtuvo al realizar la prueba (Figura 4b). El análisis de resultados indica que la conductividad térmica del suelo del sitio es $\lambda = 1.63 \text{ Wm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y la resistencia térmica de la pila es $R_b = 0.090 \text{ m}^\circ\text{CW}^{-1}$. Estos valores son similares a los reportados en la literatura para pilas de energía (Loveridge *et al.*, 2013) y arenas no saturadas (Dalla Santa *et al.*, 2020).

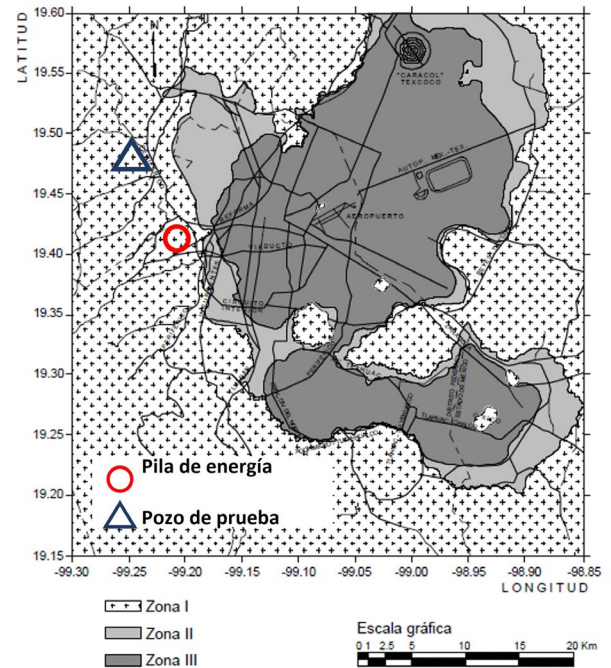
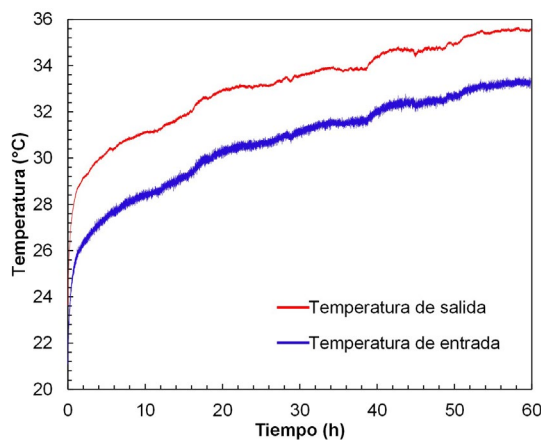
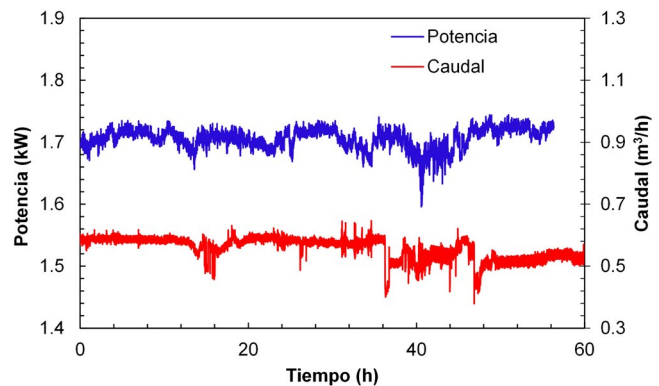


Figura 3. Ubicación de los sitios de las primeras pruebas ejecutadas con el equipo móvil TRT-IIUNAM



a)



b)

Figura 4. a) Temperaturas de entrada y de salida del fluido durante la prueba TRT, b) Variación de la potencia y la tasa de flujo

TRT ejecutado en un pozo intercambiador de calor de prueba

La zona de estudio (Figura 3) se compone principalmente de arenas limosas y gravas. En la Tabla 2 se presentan las características principales de la prueba TRT efectuada en el pozo intercambiador de calor. Como complemento al TRT *in situ*, se extrajeron ocho muestras inalteradas de suelo. Las muestras se utilizaron para medir la conductividad térmica λ en laboratorio con el método de la aguja térmica, mediante el equipo KD2 Pro. Este equipo es capaz de medir adicionalmente la capacidad calorífica volumétrica c_{cv} y la difusividad térmica D de los suelos.

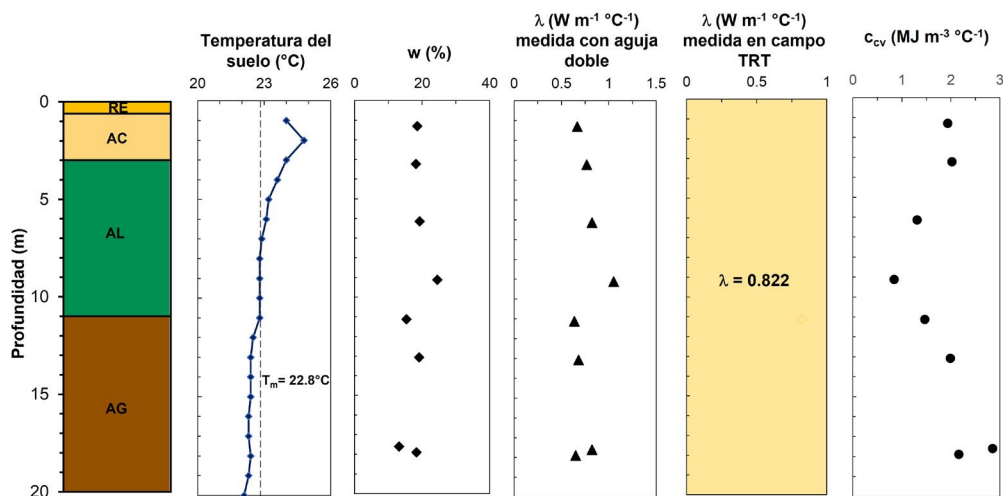
En la Figura 5 se presenta el perfil estratigráfico con la temperatura del sitio de prueba, el contenido de agua, así como las propiedades térmicas medidas en laboratorio y campo con el ensayo de respuesta térmica TRT-IIUNAM. Los resultados de las pruebas indican que el suelo ensayado tiene una conductividad térmica baja.

Tabla 2. Características principales de la prueba ejecutada en un pozo de prueba

Diámetro	0.15 m
Longitud	20.0 m
No. Bucles	1
Duración de la prueba	160 horas
Método de análisis	Modelo de fuente lineal infinita (Ingersoll y Plass, 1948)

Por otra parte, la conductividad térmica medida en las pruebas de laboratorio resultó inferior a la obtenida con el ensayo TRT *in situ*. Esta discrepancia se ha reportado previamente en estudios internacionales (Low *et al.*, 2015) y se asocia a efectos de escala.

Los resultados obtenidos en esta investigación aportan gran conocimiento de las propiedades térmicas de los suelos nacionales y representa un recurso invaluable para la implementación de estructuras termoactivas en nuestro país. |



Nota: RE= material de relleno, AC= arena limosa color café, AL= arena limosa color gris con grava, AG= arena limosa con poca grava, w = contenido de agua (%), λ = conductividad térmica del suelo ($W m^{-1} °C^{-1}$), c_{cv} = capacidad calorífica volumétrica ($MJ m^{-3} °C^{-1}$)

Figura 5. Perfil estratigráfico con la temperatura del sitio de prueba, el contenido de agua, así como las propiedades térmicas medidas en laboratorio y campo

Referencias

- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56, 81-122.
- Dalla Santa, G.; Galgaro, A.; Sassi, R.; Cultrera, M.; Scotton, P.; Mueller, J.; Bertermann, D.; Mendrinós, D.; Pasquali, R.; Perego, R. *et al.* (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758.
- Gehlin, S. (2002). Thermal Response Test. Method Development and Evaluation. Luleå University of Technology, Sweden. 191.
- Ingersoll, L. R. y Plass, H. J. (1948). Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump. *ASHVE Transactions*, 54, 339-348.
- Loveridge, F.; Powrie, W. y Smith, P. (2013). A review of the design and construction aspects for bored thermal piles. *Ground Engineering*, 2011-2014.
- Loveridge, F.; Powrie, W. y Nicholson, D. (2014). Comparison of two different models for pile thermal response test interpretation. *Acta Geotechnica*, 9(3), 367-384.
- 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(2), 209-218.
- 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.