

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS SUELOS

NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA,
 DIANA MARGARITA PORTILLO ARREGUÍN
 Y DAVID FRANCISCO BARBA GALDÁMEZ

Determinar las propiedades térmicas de los suelos es fundamental en diversas aplicaciones de la Ingeniería Geotécnica, como el diseño de estructuras termoactivas, el aislamiento de sistemas de transmisión subterráneos, el almacenamiento de desechos sólidos y radioactivos, así como la estabilización térmica de suelos (Farouki, 1986). Debido a su naturaleza polifásica, la transferencia de calor en los suelos es un fenómeno complejo que involucra múltiples procesos simultáneos. Sin embargo, la conducción es el mecanismo dominante en la mayoría de los casos. Ésta ocurre cuando el calor fluye a través de la interacción entre partículas debido a un gradiente térmico. La conducción se encuentra definida por la ecuación de Fourier-Biot (Brandl, 2006):

$$\rho c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q_v \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del material, c_s es la capacidad calorífica específica, T es la temperatura, t es el tiempo, λ es la conductividad térmica y q_v es la tasa de generación de energía por unidad de volumen. A la relación $(\lambda / \rho c_s)$ se le conoce como coeficiente de difusividad térmica (α), que es una medida de la velocidad de propagación del calor en el medio debido a cambios de temperatura.

Pese a su creciente importancia, a conocimiento de los autores, no se ha llevado a cabo una caracterización sistemática de las propiedades térmicas (λ , c_s , α) de los suelos mexicanos. Recientemente, en la Coordinación de Geotecnia se adquirió un equipo de laboratorio denominado "Aguja térmica" (Fig. 1a) para la determinación de las propiedades térmicas efectivas de diferentes materiales. El equipo consiste en dos sondas paralelas de acero inoxidable (de 30 mm de longitud y 1.3 mm de diámetro) con una separación de 6 mm entre ellas. La primera sonda contiene una resistencia que suministra energía al medio, mientras que la otra posee un termopar que mide los cambios de temperatura causados durante la transferencia de calor.

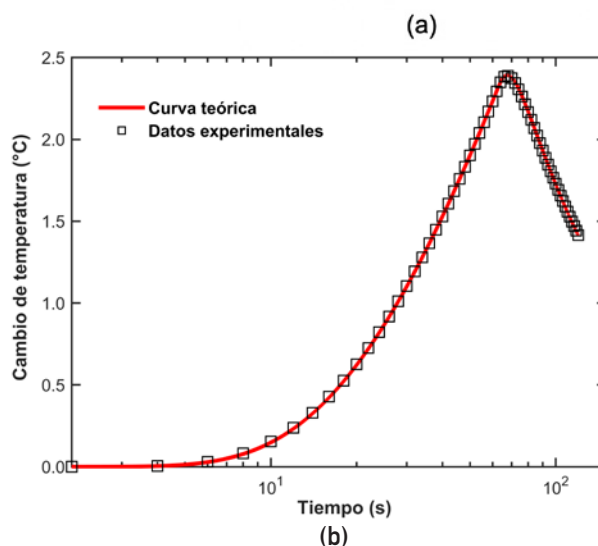
La determinación de los parámetros se efectúa a partir de la interpretación de los registros de cambio de temperatura ΔT contra tiempo. Para ello, se utiliza la solución teórica para el flujo de calor causado por una fuente de energía lineal e infinita, según la cual (Carslaw y Jaeger, 1959):

$$\Delta T = \begin{cases} -\frac{q}{4\pi\lambda} E_i\left(-\frac{r^2}{4\rho c_s t}\right), & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{q}{4\pi\lambda} \left[-E_i\left(-\frac{r^2}{4\rho c_s t}\right) + E_i\left(-\frac{r^2}{4\rho c_s (t-t_0)}\right) \right], & t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

donde q es la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud, r es la distancia radial, t_0 es el periodo en el que se suministra energía al medio y $E_i(\cdot)$ es la función integral exponencial. Así, los valores de λ y c_s se obtienen al ajustar los datos experimentales a la Ecuación 2 utilizando mínimos cuadrados no lineales (Fig. 1b).



Figura 1. (a) Equipo de la aguja térmica, y (b) curva de ajuste para una prueba de aguja térmica



Actualmente, este equipo se ha utilizado para caracterizar térmicamente en laboratorio e *in situ* los suelos de diferentes Estados de la República (Ciudad de México, Estado de México y Tabasco). A continuación, se describen algunos resultados obtenidos para muestras arcillosas en un sitio del Valle de México (para mayor información puede consultarse Portillo, 2019). Éstas provienen de un sondeo TX1 efectuado en el ex-Lago de Texcoco (Fig. 2). La estratigrafía del sitio está compuesta principalmente por formaciones arcillosas de origen lacustre de baja resistencia y alta compresibilidad denominadas Formación Arcillosa Superior (FAS) y Formación Arcillosa Inferior (FAI), separadas por un estrato de material limo arenoso denominado Capa Dura (CD) (Fig. 3).

En la Figura 3 se presenta el perfil de las propiedades térmicas (λ , c_s y α) obtenidas en las muestras del sondeo TX1 junto con algunas propiedades índice (contenido de agua w,

relación de vacíos e, y contenido de materia orgánica MO). Se observa que la conductividad térmica λ de las formaciones arcillosas varía entre 0.660 y 0.745 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, mientras que la capacidad calorífica específica c_s fluctúa entre 1160 y 3010 $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Los valores de conductividad térmica son inferiores a los valores reportados en la literatura para arcillas saturadas (Rawlings y Sykulski, 1999), lo cual, se atribuye a las altas relaciones de vacíos (3.8-11.8) características de las arcillas del Valle de México. De hecho, las conductividades obtenidas en TX1 son ligeramente superiores a la conductividad térmica del agua a 25°C (0.607 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Debido a un desconocimiento generalizado de sus características y principios de funcionamiento, las estructuras termoactivas no se utilizan actualmente en México. La determinación de las propiedades térmicas de los suelos nacionales permitirá el diseño y la implementación de tales estructuras en nuestro país.

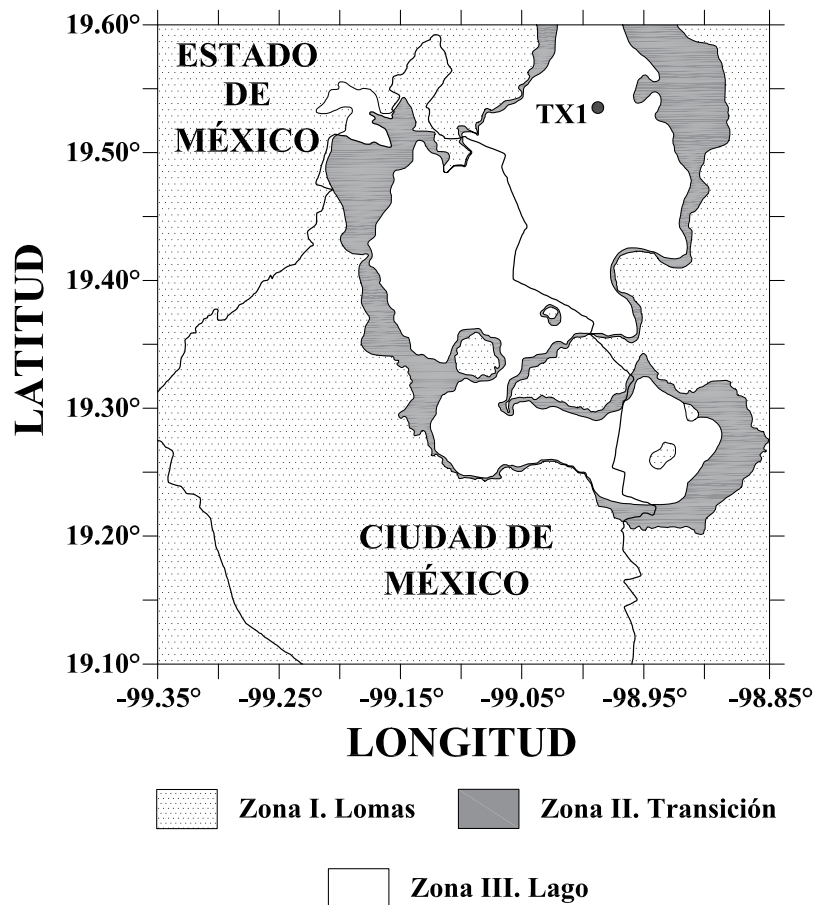


Figura 2. Ubicación del sondeo TX1

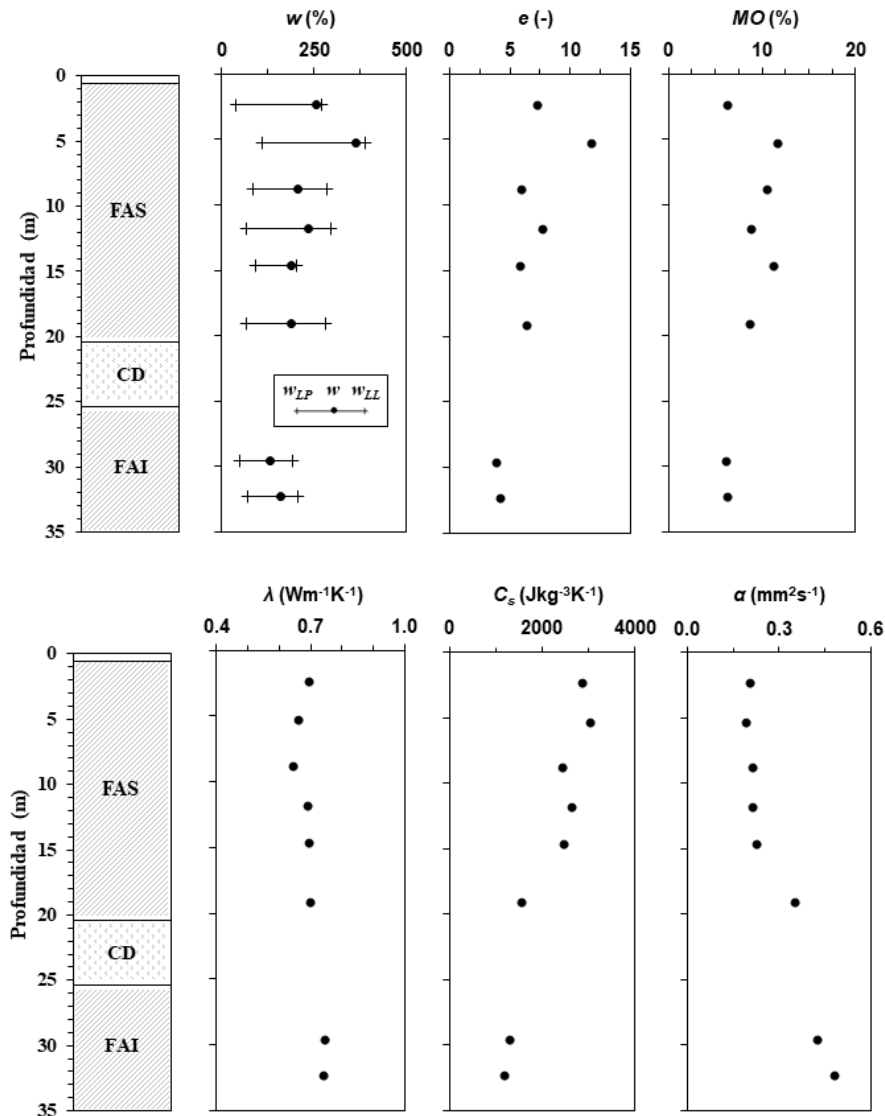


Figura 3. Perfil con propiedades índices y térmicas de muestras arcillosas del sondeo TX1 en el Valle de México (w_{LP} = límite plástico y w_{LL} = límite líquido).

Referencias

- 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.
- Farouki, O. T. (1981). *Thermal properties of soils*. CRREL Monograph 81-1. United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Portillo-Arreguín, D. M. (2019). *Determinación experimental de las propiedades térmicas del suelo del ex-Lago de Texcoco*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- Rawlings, R. H. D. y Sykulski, J. R. (1999). Ground source heat pumps: A technology review. *Building Services Engineering Research and Technology*, 20, 119-129.