

Medición de la profundidad de flujo de calor y difusividad térmica en suelos con texturas diferentes por dos métodos de análisis

Depth measuring heat flux and thermal diffusivity in soils with different texture by two analysis method

Armando López Santos^{1*}, Alejandro Zermeño González², José Luis González Barrios³, Guillermo González Cervantes³, Marfín Cadena Zapata², Santos Gabriel Campos Magaña²

López Santos, A., Zermeño González, A., González Barrios, J. L., González Cervantes, G., Cadena Zapata, M., Campos Magaña, S. G. Medición de la profundidad de flujo de calor y difusividad térmica en suelos con texturas diferentes por dos métodos de análisis. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. Número 62: 17-25, mayo-agosto 2014.

RESUMEN

Los estudios de térmica de suelos proporcionan información básica de utilidad por su estrecha relación con procesos biológicos y fisicoquímicos indispensables, tanto para ambientes naturales como los sujetos a manejo, como los dedicados a la producción agrícola y ambientación urbana. El objetivo del presente estudio fue comparar dos métodos, relación de rangos (RR) y máxima ocurrencia (MO), para estimar la profundidad de amortiguamiento (d) y la difusividad térmica (α), por ser dos variables que describen el comportamiento teórico del flujo vertical de la temperatura en el suelo. La presente investigación se llevó a cabo en el Jardín Hidráulico del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista, Saltillo, Coahuila (Lat. 25.353 N y Long -101.033° O); el clima es templado seco, C(W₀), con temperatura media anual de 16.9 °C y lluvias de 498 mm, donde se colocaron termopares tipo T para

Palabras clave: difusividad térmica, temperatura del suelo.

Keywords: thermal diffusivity, soil temperature.

Recibido: 25 de mayo de 2013, **aceptado:** 12 de mayo de 2014

¹ Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.

² Departamento de Riego y Drenaje, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

³ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

* Autor para correspondencia: armando.lopezsantos@gmail.com

medir la temperatura en suelos de textura arenosa, franca y arcillosa, a seis profundidades: 2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm y 50 cm. Los resultados indicaron que el mejor método de medición fue el de relación de rangos (RR), ya que la diferencia entre los valores medidos con los sensores (16.06 °C) y el calculado (16.09 °C) es muy pequeño y la diferencia estadística entre ambas series de datos (RR y MO) fue altamente significativa ($\alpha \geq 0.05$).

ABSTRACT

Thermal studies of soils provide basic information useful for their close relationship with essential physicochemical and biological processes, both natural environments and those subject to management, such as those devoted to agricultural production and urban setting. The target of this study was to compare two methods, rank ratio (RR) and maximum occurrence (MO), to estimate the damping depth (d) and thermal diffusivity (α), for being two variables that describe the theoretical behavior vertical flow of the soil temperature. This research was carried out in the Hydraulics Garden Irrigation and Drainage Department of the Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro in Buenavista, Saltillo, Coahuila; Mexico (Lat 25.353 N and Long 101 033 ° W), the climate is dry and temperate, C(W₀), with annual average temperature of 16.9 °C and rainfall of 498 mm, where type T thermocouples were placed to measure the temperature in soils of sandy, loamy and clayish, at six depths: 2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm,

30 cm and 50 cm. The results indicated that the best method of measurement was the ratio ranges (RR) since the difference between the values measured with the sensors (16.06 °C) and the calculated (16.09 °C) is very small and the statistical difference between both sets of data (RR and MO) was highly significant ($\alpha \geq 0.05$).

INTRODUCCIÓN

El flujo de calor en el suelo (G) es un componente importante del balance de energía en la superficie de la tierra (Su, 2002; Zvomuya et al., 2008; Ozturk et al., 2011). Comúnmente G no excede del 10% al 15% de la radiación neta (R_n) (Shao et al., 2008; Verhoef et al., 2012). Sin embargo, puede ser mucho mayor en el balance diario para horas de mayor calor, particularmente en ambientes áridos con escasa humedad y en épocas de sequía (Horton y Wierenga, 1983; Heusinkveld et al., 2004; Evett et al., 2012; Smalls-Mantey et al., 2013). Smalls-Mantey et al. (2013) mencionan que este componente en suelos desnudos puede alcanzar hasta el 50 % de R_n (G/R_n).

La importancia de G radica en que una vez que se calienta una capa muy delgada de suelo (interface suelo-atmósfera; ≈ 3 cm), la energía que no se disipa como calor latente (LE) y/o calor sensible (H), el calor queda almacenado (ΔG) y se transfiere de modo gradual a mayores profundidades, lo que afecta (o activa) con ello el ritmo de procesos físicos, químicos y biológicos (Gao, 2005; Agnieszka, 2006; Ochsner et al., 2007; Evett et al., 2012); por ejemplo, la respiración del suelo que representa actividad biológica en la capa superior, a 8 cm de profundidad, se ha visto como el factor dominante en ecosistemas áridos (Ma et al., 2014).

La transferencia de energía en forma de calor también se conoce como *difusividad térmica* (α), en la capa de suelo –o cualquier otro material– sufre una atenuación que depende de la diferencia de temperatura entre sus extremos y el espesor de la misma, variable que se denomina *profundidad de amortiguamiento* (d) (Horton y Wierenga, 1983; Cengel y Ghajar, 2011); por tanto, la medición de α y d , además de indicar la rapidez con la que se difunde la energía en la capa edáfica revela zonas de mayor viabilidad para la vida microbiana (Parkin y Kaspar, 2003; Ozturk et al., 2011), difusión gaseosa, condiciones óptimas para la germinación de semillas

de plantas cultivadas (Gupta, et al., 1984; Drury et al., 1999), disponibilidad de nutrientes, etc... (Ochsner et al., 2007; Xiao et al., 2011); por tanto, la medición de estas variables además de facilitar la comprensión de transferencia de calor entre dos sistemas (Cengel y Ghajar, 2011; Oldroyd et al., 2013), por ejemplo en la modelación del flujo de agua y energía (Evett et al., 2012; Illston et al., 2013; Oldroyd et al., 2013), su aplicación se extiende a otros campos de la ciencia, como el diseño de espacios urbanos, entre otros (Smalls-Mantey et al., 2013).

El objetivo del presente estudio fue comparar dos métodos: relación de rangos (RR) y máxima ocurrencia (MO) para estimar la *profundidad de amortiguamiento* (d) y la *difusividad térmica* (α), por ser dos variables que describen el comportamiento teórico del flujo vertical de la temperatura en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se llevó a cabo en el Jardín Hidráulico del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista, Saltillo, Coahuila (Lat. 25.353 N y Long -101.033° O), cuyo clima Encina et al. (2009) describen como templado seco, $C(W_0)$, con temperatura media anual de 16.9 °C y precipitación media anual de 498 mm; en este lugar se instalaron sensores termoeléctricos o termopares tipo T (cobre-constantán) para medir la temperatura en suelos de textura arenosa, franca y arcillosa, a seis profundidades: 2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm y 50 cm; conectados a un registrador electrónico; las mediciones de la temperatura se realizaron de manera ininterrumpida durante 5 días en el periodo comprendido desde el 4 de noviembre de 2007 hasta el 9 de noviembre de 2007 (308-313), con promedios cada 30 minutos de un total de 10 registros por segundo.

Cengel y Ghajar (2011) mencionan que la transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de la más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma. La rapidez o razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa.

El objetivo de varios estudios (Chacko y Renuka, 2002; Elimoel et al., 2004; Agnieszca, 2006) ha sido encontrar la función $T = T(z, t)$, donde T es la temperatura del suelo en °C que se produce en un tiempo t en segundos y a una profundidad z en metros; esta función puede ser encontrada mediante la modelación del movimiento de la energía en el suelo, basada en leyes físicas y algunos parámetros empíricos. Al respecto, Elimoel et al. (2004) reportaron que Van Wijk y De Vries propusieron en 1963 un modelo de análisis vertical unidimensional, en el que la temperatura del suelo es asumida para satisfacer la ecuación de calor de la siguiente forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{Ec 1})$$

donde K ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) es la difusividad térmica, que se asume como un valor constante con la profundidad (z) y el tiempo (t). Además, hay dos condiciones de frontera que deben ser satisfechas:

La primera condición de frontera está dada por:

$$T(0, t) = T_m + A_s * \text{Sen}(\omega t + \phi) \quad (\text{Ec 2})$$

donde se indica que la temperatura de la superficie varía sinusoidalmente con el tiempo, teniendo un valor promedio en el tiempo de T_m (°C), una amplitud A_s (°C), una frecuencia radial w (rad s^{-1}) y una fase constante f (rad).

La segunda condición de frontera está dada por:

$$\lim_{z \rightarrow \infty} T(z, t) = T_m \quad (\text{Ec 3})$$

La solución que satisface las ecuaciones (1), (2) y (3), escrita en la serie de Fourier, presentada en varios estudios (Karam, 2000; Elimoel et al., 2004; Gao et al., 2007; Ozgener et al., 2013) es:

$$T(z, t) = T_m + A_s * \text{Sen} \left[\left(\frac{2\pi}{P} \right) (t - t_m) - \frac{z}{d} + \phi \right] \quad (\text{Ec 4})$$

donde d es la *profundidad de amortiguamiento* de la onda de calor (o *damping depth*) que es equivalente a la raíz cuadrada del cociente que resulta del periodo (P) y la *difusividad térmica* (a) sobre una fase radial, que se expresa como:

$$d = \sqrt{(P * \alpha) / \pi} \quad (\text{Ec 5})$$

Evidentemente, para obtener las curvas que describen el comportamiento armónico de la temperatura en el suelo, es necesario determinar el valor de α y consecuentemente el valor d en m; es decir, si el supuesto principal de este método de análisis es el desarrollo armónico de los cambios de la temperatura durante ciclos diarios o anuales, la profundidad de amortiguamiento de la curva de calor (*damping depth*) puede ser calculado de la fase de cambio y de la relación de la amplitud de la onda de temperatura, cuya representación se presenta en las Figuras 1a y 1b (Agnieszca, 2006).

Para el cálculo de la *difusividad térmica* por el método tiempo de ocurrencia máxima habrá que partir de la relación entre los valores máximos o mínimos a las profundidades z_1 y z_2 , de tal manera que la ecuación que representa dicha relación es la siguiente:

$$\alpha = \frac{P}{\pi [2(t_2 - t_1) / (z_2 - z_1)]^2} \quad (\text{Ec 6})$$

De la ecuación anterior, debe advertirse que si el valor de α se expresa en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, entonces P debe ser expresado en segundos (24×3600); de este modo, una vez calculado el valor de α se aplica la ecuación (5).

Por otro lado, el método de la relación de rangos a cualquier profundidad, en teoría está dado por la siguiente relación:

$$T_{RZ} = T_{RS} e^{-z/d} \quad (\text{Ec 7})$$

La incógnita en este procedimiento es d , de tal modo que para despejar esta variable se aplica el

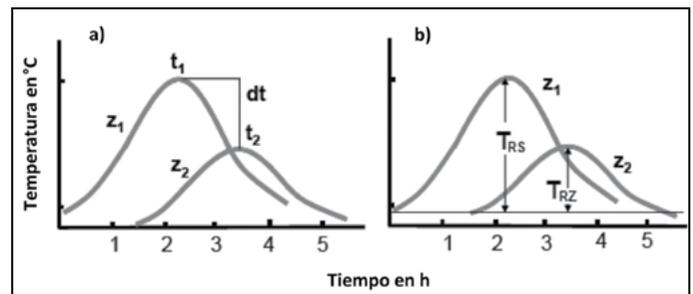


Figura 1. Representación gráfica para el cálculo de d y α a partir a) del tiempo de ocurrencia máximo o mínimo y b) de la relación de rangos. Fuente: Modificado de Agnieszca (2006).

logaritmo natural (\ln), quedando la expresión de la siguiente forma:

$$\ln T_{RZ} = \ln T_{RS} - z/d * \ln(e) \quad (\text{Ec } 8)$$

De la expresión anterior (8), se observa que al quedar el \ln de la base e , su valor es igual a uno y al despejar la variable objetivo la expresión queda de la siguiente manera:

$$d = \frac{-z}{\frac{(\ln T_{RZ})}{(\ln T_{RS})}} \quad (\text{Ec } 9)$$

Los datos seleccionados para medir las variables α y d correspondieron a las profundidades de 2 cm y 20 cm, de un ciclo completo o periodo de 24 h (6:00 a 6:00 h) de los días 311 y 312. El criterio para la selección del periodo se basó en la observación de un comportamiento suavizado y armónico de la onda de la temperatura, permitiendo con ello determinar los momentos en los cuales la temperatura se encontró en su fase ascendente, así como el valor de la temperatura media (T_m) para cada una de los tres suelos estudiados (Figura 2).

Para el análisis de varianza (ANDEVA) se consideraron como fuentes de variación las tres texturas de suelo (arena, limo y arcilla) con tres repeticiones considerando para ello los 5 días de medición; además se realizó una comparación de medias para evaluar la hipótesis de igualdad de medias (H_0) a partir de la prueba del rango estudentizado de Tukey con un intervalo de confianza de 95 % ($\alpha \geq 0.05$).

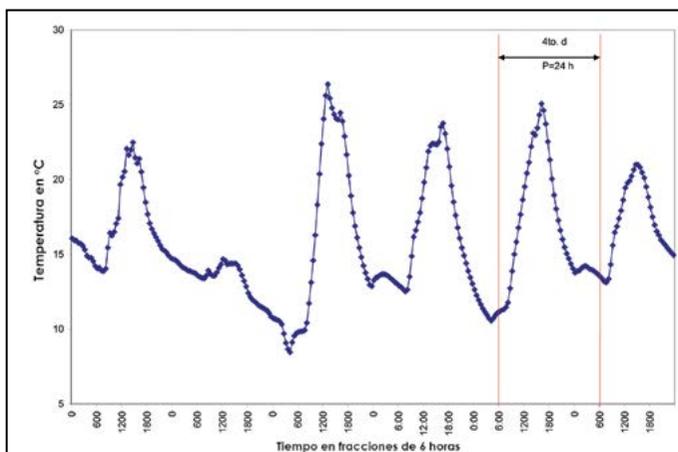


Figura 2. Registro de 5 días flujo de calor y selección del periodo (P , 4^o día) para el análisis del comportamiento del flujo energético en la capa de suelo.

RESULTADOS

Durante los 5 días de medición se obtuvieron un total de 5,184 datos de temperatura, de los cuales se emplearon para el estudio del fenómeno de flujo de calor poco menos de 70%. El análisis de (todos) los datos para cada textura (1205) tuvo un promedio (T_{med}) muy semejante, pero conforme a la magnitud de los rangos entre T_{max} (temperatura máxima) y T_{min} (temperatura mínima) se observó una variación de 15.9 °C, 17.9 °C y 18.9 °C para limo, arena y arcilla, respectivamente; para el análisis por grupo de datos, mediante el rango estudentizado de Tukey se encontró que a 2 cm y 5 cm de profundidad en las tres texturas no hay diferencia estadística, no siendo así para las tres profundidades restantes, con excepción de la arena de 20 cm a 30 cm y de 30 cm a 50 cm de profundidad (Tabla 1).

De acuerdo al método de selección de datos para el cálculo de α y d , T_m indica el momento exacto en horas y minutos en que la fase de la curva senoide de esta variable (temperatura) es ascendente, de tal manera el suelo de textura arenosa a nivel de la superficie (2 cm de profundidad) se calentó más rápido que los otros dos suelos, y tuvo una temperatura menor aproximadamente de 1°C respecto a la arcilla (Figura 3). Es decir, el valor de T_m a la profundidad de 2 cm en el suelo de textura arcillosa fue de 17.08 °C, ocurrió ésta a las 11:00 h, en tanto que a los 90 minutos y 30 minutos después se presentó en los suelos de textura arenosa (16.06 °C) y franca (16.96 °C), respectivamente (Figura 3a, 3b y 3c). Del mismo modo, se observó que la onda de calor a la profundidad de 20 cm en el suelo arcilloso produjo una temperatura promedio de 16.84 °C (15:30 h), la cual ocurrió 60 minutos después que en la textura arenosa (16.81 °C), pero 30 minutos antes que en la textura franca (16.76 °C) (Figura 3b, 3d, 3f). En la Tabla 2 se muestran los resultados hasta aquí descritos.

Las variables de entrada y los resultados de cálculo por los métodos de la máxima ocurrencia (MO) y por la relación de rangos (RR) evidencian que los valores para α y d son distintos, especialmente para la primera variable (α); para la variable d en el caso del suelo de textura arenosa el valor obtenido por ambos métodos presenta una diferencia de sólo 2 mm, pero la diferencia es mayor para el suelo franco al ser de 22 cm, diferencia que se reduce para la arcilla en 12 cm; en tanto que por el método

Tabla 1. Estadística de los datos de temperatura descriptiva y resultados del ANOVA para cada textura a diferentes profundidades

Textura	Estadística descriptiva			Tmed para cada profundidad en cm					
	Datos	Tmin	Tmax	Tmed	2	5	20	30	50
	No.	-----°C-----							
Arena	1205	8.5	26.4	16.7	15.8 (ab)	16.0 (ab)	16.8 (cd)	17.2 (def)	17.8 (fg)
Limo	1205	8.5	24.4	16.9	15.3 (a)	15.6 (ab)	17.0 (de)	17.7 (efg)	18.8 (h)
Arcilla	1205	8.5	27.3	16.9	15.9 (ab)	16.1 (bc)	16.8 (cd)	17.5 (defg)	18.2 (gh)

Tmin = temperatura mínima; Tmax = temperatura máxima; Tmed = temperatura media; Std = desviación estándar. Letras distintas dentro del paréntesis (*cursivas*) para cada textura indican diferencia estadística altamente significativa.

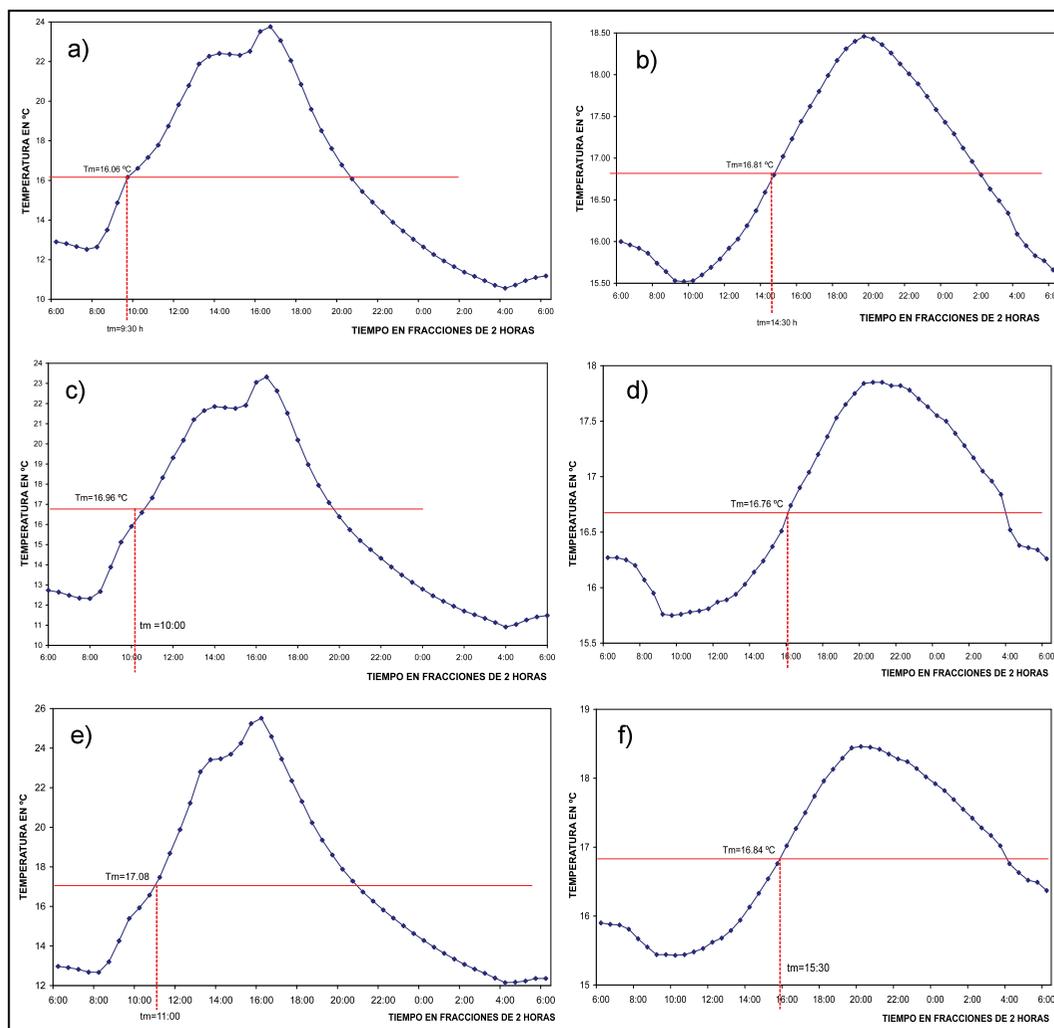


Figura 3. Localización gráfica de los momentos (t) y valor de la temperatura media (Tm) encontrada en su fase ascendente del periodo P (311-312, 6:00-6:00 h) para las tres texturas de suelo: arenoso (a, b), franco (c, d) y arcilloso (e, f), a las profundidades de 2 cm (a, c, e) y 20 cm (b, d, f).

Tabla 2. Variables de entrada para la estimación de la difusividad térmica (α) y profundidad de amortiguamiento de la onda de calor (d).

Variables/textura-Profundidad	Texturas de suelo					
	---- Arena ----		---- Franco ----		---- Arcilla ----	
	2 cm	20 cm	2 cm	20 cm	2 cm	20 cm
T_m (°C)	16.06	16.81	16.96	16.76	17.08	16.84
t (Hmin)	9:30	14:30	10:00	16:00	11:00	15:30

Hmin= tiempo en horas y minutos.

Tabla 3. Resultados obtenidos para α y d por los métodos de ocurrencia máxima (MO) y de la relación de rangos (RR) de la temperatura

Variables/Método	Texturas de suelo		
	Arena	Limo	Arcilla
Método MO			
$t_2 - t_1$	3.0	4.5	4.0
$z_2 - z_1$	18.00	18.00	18.00
α (m^2s^{-1})	6×10^{-6}	2.67×10^{-6}	3.38×10^{-6}
d (m)	0.41	0.27	0.30
Método RR			
T_{RS} (°C)	13.20	7.57	13.36
T_{RZ} (°C)	2.94	2.1	3.03
α (m^2s^{-1})	7.83×10^{-6}	8.93×10^{-6}	7.65×10^{-6}
$d_{z=0.18}$ (m)	0.43	0.49	0.42

RR los valores de α obtenido fueron 7.83, 8.93 y 7.65×10^{-6} , con profundidades para la curva de atenuación de 0.43, 0.49 y 0.42 para las texturas arena, limo y arcillosa, respectivamente (Tabla 3).

El resultado de la construcción de las curvas sinusoidales mediante el método RR, entre 2 y 20 cm (Figura 4) muestra la forma armónica que tienen las curvas, lo cual está de acuerdo a lo previsto en la ecuación 4, excepto por el empleo de la constante radial (f).

Del análisis de datos que dan lugar a la construcción de las figuras se desprenden las siguientes características: a) para la textura arenosa, la temperatura máxima a la profundidad de 2 cm es de 22.55 °C, la cual se presenta a las 15:00 h, mientras que a la profundidad de 20 cm a las 21:00 h se alcanzan 18.68 °C; b) para el suelo de textura franca,

a las 16:00 h se alcanza la temperatura máxima con un valor de 22.60, mientras que a la profundidad de 20 cm a las 22:00 h su valor es de 18.16 °C; y c) por último, en el caso del suelo de textura arcillosa a 2 cm de profundidad, la temperatura máxima es de 22.6 °C, que corresponde a las 17:00 h, mientras que a la profundidad de 20 cm a las 21:00 h se alcanzan 17.77 °C.

Por otro lado, al comparar el comportamiento que se presenta en la Figura 5, de la temperatura que resulta de la aplicación de las variables (d y α) obtenidas por ambos métodos, se observa que para la onda de calor la temperatura para la profundidad de 2 cm en la textura arenosa, donde la diferencia en $d=2$ mm, existe una máxima en el método de la relación de rangos de 22.55 °C, mientras que en la de ocurrencia máxima su valor es de 6.18 °C, pero la hora es la misma para ambos valores.

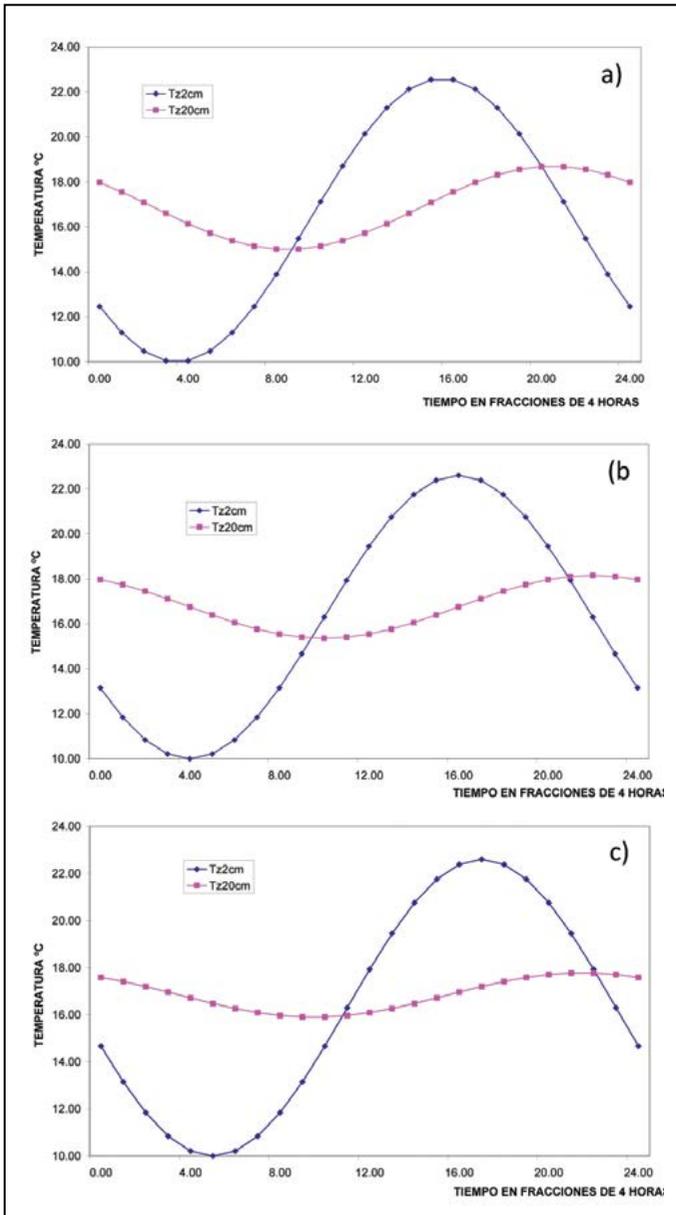


Figura 4. Curvas sinusoidales generadas por el método RR a partir de los datos conforme al análisis y datos de entrada ya descritos (Tabla 3) para arena (a), limo (b) y arcilla (c).

Además, debe observarse que con la metodología de ocurrencia máxima las variables de entrada en el modelo producen valores negativos, mientras que con la de relación de rangos no; de hecho, este método produce valores muy parecidos a los datos originales. Por ejemplo, si se compara la temperatura media de los datos originales y la obtenida con el modelo, tenemos que $Tm_{orig} \approx Tm_{R/R'}$ porque sus valores son 16.06 y 16.15, respectivamente.

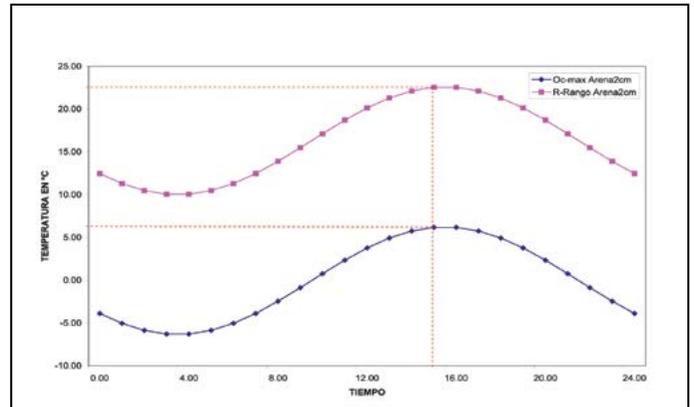


Figura 5. Comparación del comportamiento de la temperatura derivado de las variables obtenidas por los dos métodos.

DISCUSIÓN

Los resultados descritos anteriormente, especialmente los mostrados en la Tabla 3 y en la Figura 5, evidencian discrepancias para las variables calculadas (α , d). El método RR es más consistente que el de MO debido al menos por dos motivos:

- 1) Los valores para la textura arenosa representados mediante las curvas sinusoidales contrastan entre sí (Figura 5) porque el 52% de los valores generados por medio del MO son negativos, toda vez que del conjunto de los datos originales menos del 1% son negativos, lo cual significa que el modelo con las variables de entrada ($t-tm$) para este caso generó valores de predicción absurdos.
- 2) Para esta misma textura (arenosa), los valores de α obtenido para las texturas arenosa y franca se encuentran muy próximos a los valores reportados previamente por Horton et al. (1983), para arena con predominio de cuarzós como en este caso, de $12.6 (\pm 1.5) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; esto basado en la medición de temperatura en distintos momentos a profundidad de 1 cm, 2 cm, 5 cm y 10 cm, para ser ajustadas al modelo Fourier, de cuya solución dicen Horton et al. (1983): "...se logra mediante técnicas estándar de regresión lineal", lo cual ha sido reconocido en estudios recientes (Min-Ho y Yoonho, 2008; Evett et al., 2012).

Aunque las diferencias en el flujo de calor descritas (Figura 3) están directamente relacionadas con dos aspectos fundamentales de los suelos: sus

propiedades térmicas, donde destaca la suma de la capacidad calórica (C_x) de componentes como el cuarzo (C_c), otros minerales (C_m) y agua (C_a), cuyos valores son de $8.4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $2.9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ y $0.6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, respectivamente (Peters-Lidard, 1998; Deru, 2003; Chacko y Renuka, 2008); las mediciones puntuales sobre las propiedades edáficas, como la densidad aparente (D_a), los factores de forma que describen la manera en la que el suelo está empacado, así como el contenido volumétrico de agua (θ); Evett et al. (2012) dice que no son indispensables al usar la serie Fourier para periodos cortos, como en este caso que fue de 24 h.

Debido a la complejidad de los factores que influyen en este tipo de análisis, tales como la absorción energética, cobertura nubosa y algunos otros derivados de procesos físicos internos, como los edáficos ya mencionados en el párrafo anterior, la variación sinusoidal de la temperatura permite simplificar el cálculo de las variables ya descritas, como lo refiere Gao et al. (2007).

Por otro lado, es importante mencionar que la estimación de G como flujo de calor en el suelo, asociado a estudios de balance energético por métodos micro meteorológicos, como el de la Covarianza Eddy —que se expresa mediante la ecuación de balance: $R_n - G = H + LE$ —, generalmente está sujeta a errores que pueden ser de hasta el 30% (Massman y Lee, 2002; Su, 2002; Heusinkveld et al., 2004; Shao et al., 2008), además porque las mediciones de la capa edáfica solo representan la energía que se transfiere entre 2 cm y 8 cm de profundidad (López-Santos et al., 2008).

Es decir, el análisis de flujos de energía se concentra en la superficie, representados por el par $LE+H$, y en una capa delgada de suelo (G), así se alejan de fenómenos que ocurren a nivel de la rizósfera dependientes de la variación de la temperatura y humedad a diferente profundidad



Figura 6. Instalación de termopares para medir temperatura del suelo en la superficie hasta 8 cm de profundidad (a, b) y en el perfil a mayor profundidad (c).

(Bahn et al., 2010; Ma et al., 2014); por ejemplo, Ma et al. (2014) mencionan que en un metaanálisis global basado en datos de respiración se encontró que el flujo de CO_2 varía de 1.9 veces a 5.7 veces dependiendo de la temperatura del suelo medida a diferente profundidad (0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm y 20 cm) y condiciones climáticas tales como la temperatura media anual y la lluvia.

CONCLUSIONES

Las diferencias encontradas entre la profundidad de amortiguamiento (d) y la difusividad térmica (a) confirman que, comparado con el método de máxima ocurrencia (MO), el método de la relación de rangos (RR) es el más adecuado para caracterizar el comportamiento de la curva sinusoidal, tanto en su fase descendente como ascendente en la capa de suelo, mediante valores de temperatura entre los límites (z) 0 cm y 20 cm de profundidad (d).

LITERATURA CITADA

- AGNIEZKA, D. D. *Thermal properties in luvisol under conventional and conservation tillage*. Tesis of Dissertation to Obtain PhD. Aus dem Institut for Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Kiel, Germany 2006.
- BAHN, M. et al. *Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes*. *Biogeosciences*, 7: 2147–2157, 2010.
- CENGEL, Y. J. y GHAJAR, A. J. *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. 4. ed., México: Ed. Mc Graw Hill. 922 pp., 2011. ISBN: 3456789012.
- CHACKO, P. T. y RENUKA, G. *Temperature mapping, thermal diffusivity and subsoil heat flux at Kariavattom of Kerala*. *Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, 111(1): 79-85, 2002.

- CHACKO, P. T. y RENUKA, G. *Thermal diffusivity of soil in iso-hyperthermic temperatura regime by harmonic analysis. Indian Journal of Radio & Soace Physics*, 37: 360-365, 2008.
 - DERU, M. *A model for ground-coupled heat and moisture transfer from buildings*. Technical report. Golden Colorado, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory. 2003.
 - DRURY, C. F. et al. *Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence. Agron. J.*, 91: 101-108, 1999.
 - ELIMOEL, E. A. et al. *Analytical soil-temperature model: correction for temporal variation of daily amplitude. Soil Sci. Soc. Am J.*, 68: 784-788, 2004.
 - ENCINA, D. J. A. et al. *Composición y aspectos estructurales de los bosques de encino de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. Acta Botánica Mexicana*, 86: 71-108, 2009.
 - GAO, Z. *Determination of soil heat flux in a tibetan short-grass prairie. Boundary-Layer Meterology*, 114: 165-178, 2005.
 - GUPTA S. C. et al. *Predicting soil temperature and soil heat flux under different tillage-surface residue conditions. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48(2): 223-232, 1984.
 - HORTON, R. y WIERENGA, P. J. *Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 14-20, 1983.
 - HORTON, R. et al. *Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 25-32, 1983.
 - KARAM MOSTAFA, A. *A thermal wave approach for heat transfer in a no uniform soil. Soil Sci. Soc. Am J.*, 64: 1219-1225, 2000.
 - LÓPEZ-SANTOS, A. et al. *Impacto de la labranza en el flujo energético de un suelo arcilloso. Revista Terra Latinoamericana*, 26(3): 203-213, 2008.
 - MASSMAN, W. J. y LEE, X. *Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. Agric. For. Meteorol.*, 113: 121-144, 2002.
 - OCHSNER, T. E. et al. *Soil heat storage measurements in energy balance studies. Agron. J.*, 99: 311-319, 2007.
 - PARKIN, T. B. y KASPAR, T. C. *Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: implications for estimating soil carbon loss. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1763-1772, 2003.
 - PETERS-LIDARD, C. D. *The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes. Journal of the Atmospheric Sciencies*, 55: 1209-1224, 1998.
 - SU, Z. *The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 85-99, 2002.
 - GAO, Z. et al. *Determination of soil temperature in an arid region. Journal of Arid Environments*, 71: 157-168, 2007. doi:10.1016/j.jaridenv.2007.03.012.
 - HEUSINKVELD, B. G. et al. *Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux. Agricultural and Forest Meteorology*, 122(2004): 21-37, 2004. doi:10.1016/j.agrformet.2003.09.005.
 - ILLSTON, G. B. et al. *Evaluation of a heat dissipation sensor for in situ measurement of soil temperature. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 77: 741-747, 2013. doi:10.2136/sssaj2012.0189.
 - MA, Y. et al. *Stand ages regulate the response of soil respiration to temperature in a Larix principis-rupprechtii plantation. Agricultural and Forest Meteorology*, 184: 179-187, 2014. doi:doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.10.008.
 - MIN-HO KOO y SONG, YOONHO. *Estimating apparent thermal diffusivity using temperature time series: A comparison of temperature data measured in KMA boreholes and NGMN wells. Geosciences Journal*, 12(3): 255-264, 2008. doi:10.1007/s12303-008-0026-5.
 - OLDROYD, H. J. et al. *Thermal diffusivity of seasonal snow determined from temperature profiles. Advances in Water Resources*, 55: 121-130, 2013. doi:doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.06.011.
 - OZGENER, O. et al. *A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62: 473-480, 2013. De: doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.031
 - OZTURK, M. et al. *Artificial neural network model for estimating the soil temperature. Can. J. Soil Sci.*, 91(4): 551-562, 2011. doi:10.4141/CJSS10073.
 - SHAO, C. et al. *Spatial variability in soil heat flux at three Inner Mongolia steppe ecosystems. Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 1433-1443, 2008. doi:10.1016/j.agrformet.2008.04.008.
 - SMALLS-MANTEY, L. et al. *Validation of two soil heat flux estimation techniques against observations made in an engineered urban green space. Urban Climate*, 3: 56-66, 2013. De: dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2012.11.001
 - VERHOEF, A. et al. *Spatio-temporal surface soil heat flux estimates from satellite data; results for the AMMA experiment at the Fakara (Niger) supersite. Agricultural and Forest Meteorology*, 154-155: 55-66, 2012. De: doi:10.1016/j.agrformet.2011.08.003
 - XIAO, X. et al. *Cumulative soil water evaporation as function of depth and time. Vadose Zone J.*, 10(July): 1016-1022, 2011. doi:10.2136/vzj2010.0070.
 - ZVOMUYA, F. et al. *Surface Albedo and Soil Heat Flux Changes Following Drilling Mud Application to a Semiarid, Mixed-Grass Prairie. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72(5): 1217-1225, 2008. doi:10.2136/sssaj2007.0430.
- De páginas electrónicas**
- EVETT, S. R. et al. *Soil profile method for soil thermal diffusivity, conductivity and heat flux: Comparison to soil heat flux plates. Advances in Water Resources*, 50(2012): 41-54, 2012. De: doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.04.012.