

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO DE SONDAS TÉRMICAS NA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA E DO FLUXO DE CALOR DO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO⁽¹⁾

A. C. D. ANTONINO⁽²⁾, C. A. B. O. LIRA⁽²⁾, A. DALL'OLIO⁽²⁾, P. AUDRY⁽³⁾
& A. X. M. PINTO⁽⁴⁾

RESUMO

A difusividade térmica aparente de um solo aluvial, no distrito de Coxixola (PB), foi determinada em condições de campo, numa parcela sem vegetação, a partir de medidas da evolução da temperatura a várias profundidades em distintas condições de umidade, em fevereiro-outubro de 1995. Foi analisada a influência da distância, Δz , entre os sensores térmicos sobre os valores de difusividade, calculados pelos seguintes métodos: fase, amplitude, logarítmico, arco tangente e harmônico. Os valores obtidos pelo método harmônico para $\Delta z = 11,0$ cm foram cerca de 13% superiores aos obtidos utilizando $\Delta z = 2,5$ cm na condição úmida e cerca de 100% na seca. A variação relativa no valor da difusividade, obtida pelos métodos, para erros de posicionamento de ± 1 cm, foi de -66% e +101%, respectivamente, quando o cálculo foi efetuado por um Δz nominal de 2,5 cm, e de -17% a +19%, por um Δz nominal de 11,0 cm. Além de identificar relevantes inconsistências entre os valores fornecidos pelos métodos, verificou-se que os valores de difusividade térmica aparente e, portanto, do fluxo de calor na superfície do solo, podem ser significativamente afetados por eventuais erros de posicionamento de sondas térmicas.

Termos de indexação: solo, temperatura, fluxo de calor, difusividade térmica.

SUMMARY: INFLUENCE OF DISTANCE BETWEEN THERMAL SENSOR POSITIONING ON THE DETERMINATION OF THERMAL DIFFUSIVITY AND SOIL HEAT FLUX UNDER FIELD CONDITIONS

Thermal diffusivity of a floodplain soil without vegetation, located at Coxixola, State of Paraíba, Brazil, was determined under field conditions. Temperature evolution at several soil depths under different moisture conditions was measured from February to October 1995. The influence of distance (Δz) between thermal sensors on the diffusivity values was evaluated. Δz was calculated by the following methods: amplitude, phase, logarithmic, arctangent, and harmonic methods. The values obtained by the harmonic method for $\Delta z = 11.0$ cm were 13% and 100% higher than those for $\Delta z = 2.5$ cm under moist and dry conditions, respectively. For positioning errors of ± 1 cm, the relative variation in the diffusivity values for $\Delta z = 2.5$ cm was

⁽¹⁾ Trabalho financiado pelo CNPq. Recebido para publicação em abril de 1996 e aprovado em janeiro de 1997.

⁽²⁾ Professor Adjunto do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). CEP 50740-540 Recife (PE).

⁽³⁾ Pesquisador ORSTOM, Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). CEP 50740-540 Recife (PE).

⁽⁴⁾ Estudante de graduação da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). CEP 50740-540 Recife (PE). Bolsista de Iniciação Científica do CNPq.

-66% and +101%, respectively, and -17% to +19% for $\Delta z = 11.0$ cm. In addition to the identification of significant discrepancies between the values obtained by the different methods, it was also found that values of thermal diffusivity and, therefore heat flux on the soil surface, may be significantly affected by positioning errors of the thermal sensors.

Index terms : soil temperature, thermal diffusivity, soil heat flux.

INTRODUÇÃO

As transferências de massa e de calor nas camadas superficiais do solo, assim como as trocas na interface solo-atmosfera, condicionam numerosos fenômenos que afetam, direta e indiretamente, a produtividade agrícola. Em particular, o fluxo de calor na superfície constitui um dos termos da equação do balanço de energia na superfície e sua estimativa possibilita a avaliação da evaporação e do fluxo de calor sensível no ar.

O fluxo de calor no solo é controlado pela sua condutividade térmica e pelos gradientes de temperatura. Os gradientes térmicos podem, em princípio, ser determinados experimentalmente, instalando-se sondas térmicas a várias profundidades. A condutividade térmica, que é função da umidade, pode ser calculada pelo produto entre a capacidade térmica volumétrica do solo, que depende da composição deste, e a difusividade térmica. Vários métodos existem para estimar a difusividade térmica no campo a partir de medidas da evolução da temperatura (Horton & Wierenga, 1983b; Balabanis, 1987). A maior parte desses métodos baseia-se na resolução da equação unidimensional de difusão de calor (equação de Fourier), supondo o meio homogêneo e isotrópico e considerando a difusividade térmica α constante.

Horton & Wierenga (1983a) propuseram um método para estimar o fluxo de calor no solo, designado harmônico, com base no ajuste dos dados de temperatura à solução por séries de Fourier da equação de calor e o compararam ao método calorimétrico, obtendo uma boa concordância entre ambos.

Em outro trabalho, Horton & Wierenga (1983b) avaliaram vários métodos de determinação da difusividade térmica, dando ênfase à qualidade e à quantidade dos dados disponíveis. Entretanto, não fizeram estudo de sensibilidade em relação a eventuais erros de posicionamento do sensor térmico, nem analisaram a dependência da difusividade térmica em relação à profundidade. Vários fatores podem concorrer para que a posição efetiva das sondas no solo, quando da sua instalação no campo, não correspondam às posições nominais. Por exemplo, desvios de horizontalidade ao inserir a sonda no solo ou a presença de obstáculos no solo, tais como: pedras, raízes, etc., desviando a ponta sensível da sonda. Quando isso acontece, as distâncias nominais não correspondem às distâncias efetivas entre as sondas. Assim, os valores calculados da difusividade podem apresentar erros sistemáticos.

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência do posicionamento das sondas na determinação da

difusividade térmica e na estimativa do fluxo de calor na camada superficial, em distintas condições de umidade, comparando cinco métodos de determinação da difusividade térmica e analisando a sensibilidade em relação a eventuais erros de posicionamento do sensor térmico.

MATERIAL E MÉTODOS

Medidas de temperatura do solo foram efetuadas em uma parcela sem vegetação, no distrito de Coxixola, município de Serra Branca (PB) (36° 38' O, 7° 41' S), de fevereiro a outubro de 1995. A parcela foi instrumentada com sondas térmicas (resistores de platina) instaladas horizontalmente nas profundidades de $z_1 = 2,5$; $z_2 = 5,0$ e $z_4 = 13,5$ cm, sendo as medidas armazenadas a cada 30 minutos em um sistema de aquisição de dados.

Neste trabalho, foram consideradas duas séries de medidas, cada uma ao longo de dois dias: a primeira, alguns dias após a saturação do perfil do solo com uma umidade volumétrica média de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (aproximadamente na capacidade de campo), denominada condição úmida, e a segunda após um longo período de secagem do solo com uma umidade volumétrica média de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, denominada condição seca.

Determinação da difusividade térmica - A difusividade térmica, nas duas condições de umidade, foi calculada, com base nas distâncias nominais $\Delta z_{12} = z_2 - z_1 = 2,5$ cm e $\Delta z_{14} = z_4 - z_1 = 11,0$ cm, por cinco métodos, a saber: fase, amplitude, arco tangente, logarítmico e harmônico (Horton & Wierenga, 1983b).

1) Fase

$$\alpha = \frac{1}{2\omega} \left[\frac{z_k - z_i}{\delta t} \right]^2 \quad (1)$$

onde δt representa o intervalo de tempo entre as temperaturas máximas nas profundidades z_i e z_k .

2) Amplitude

$$\alpha = \frac{\omega}{2} \left[\frac{z_k - z_i}{\ln A_i / A_k} \right]^2, \text{ com } \omega = \frac{2\pi}{P} \quad (2)$$

onde P representa o período fundamental do ciclo térmico no solo; z_i e z_k , as profundidades, e A_i e A_k , as correspondentes amplitudes da temperatura.

3) Arco tangente

$$\alpha = \frac{\omega(z_k - z_i)^2}{2 \left\{ \arctg \left[\frac{(T_{i1} - T_{i3})(T_{k2} - T_{k4}) - (T_{i2} - T_{i4})(T_{k1} - T_{k3})}{(T_{i1} - T_{k3})(T_{k1} - T_{k3}) + (T_{i2} - T_{i4})(T_{k2} - T_{k4})} \right] \right\}^2} \quad (3)$$

4) Logarítmico

$$\alpha = \left[\frac{0,0121(Z_k - Z_i)}{\ln B} \right]^2 \text{ sendo } B = \frac{(T_{i1} - T_{i3})^2 + (T_{i2} - T_{i4})^2}{(T_{k1} - T_{k3})^2 + (T_{k2} - T_{k4})^2} \quad (4)$$

onde T_{in} e T_{kn} ($n = 1, 2, 3, 4$) representam as temperaturas nas profundidades z_i e z_k a cada intervalo de seis horas, medidas durante um dia.

5) Harmônico:

Baseia-se na solução analítica da equação de difusão de calor, equação de Fourier, submetida às seguintes condições:

$$T(0, t) = \bar{T}_t + \sum_{n=1}^N A_{0n} \sin(n\omega t + \Phi_{0n}) \quad \text{e} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} T(z, t) = \bar{T}_t \quad (5)$$

que fornece (Carslaw & Jaeger, 1959):

$$T(z, t) = \bar{T}_t + \sum_{n=1}^N A_{0n} \exp(-z/D_n) \sin(n\omega t + \Phi_{0n} - z/D_n) \text{ com } D_n = \sqrt{\frac{2\alpha}{n\omega}} \quad (6)$$

onde $\bar{T}_t$ representa a temperatura média do perfil de solo; n , a ordem da harmônica considerada; N , o número total de harmônicas e D_n , a profundidade de amortecimento da n -ésima harmônica.

A partir das medidas de temperatura, efetua-se um primeiro ajuste da condição inicial $T(0, t)$ a uma profundidade z_1 , considerada como origem, o que permite estimar os valores de $\bar{T}_t$ e dos coeficientes A_{0n} e Φ_{0n} . A seguir, calcula-se a distribuição das temperaturas em outra profundidade z_2 , para diferentes valores de α . O valor da difusividade térmica que minimiza uma adequada função de perda (neste trabalho: a soma dos quadrados dos desvios entre as temperaturas calculadas e os correspondentes valores experimentais) constitui o estimador procurado.

Determinação do fluxo térmico - As capacidades térmicas volumétricas aparentes, $C(\theta)$, foram determinadas pela soma das capacidades caloríficas dos diferentes constituintes do solo, ponderados por seus teores volumétricos (De Vries, 1963), obtendo-se,

para a condição úmida, o valor de $2,04 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e, para a condição seca, $1,37 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

O fluxo de calor foi calculado, para $z = 3,0 \text{ cm}$, pelo método harmônico, conforme descrito abaixo.

O fluxo vertical de calor por condução é dado por:

$$G(z) = \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

onde $G(z)$ representa a densidade de fluxo térmico na cota z , e $\lambda(\theta)$ a condutividade térmica aparente do solo.

O gradiente de temperatura pode ser obtido diferenciando a equação (6) em relação a z , fornecendo, após simplificação:

$$\frac{\delta T(z, t)}{\delta z} = \sum_{n=1}^N \left\{ -A_{0n} \sqrt{n\omega/\alpha} \exp\left(\frac{-z}{D_n}\right) \sin\left[n\omega t + \Phi_{0n} + \frac{\pi}{4} - \frac{z}{D_n}\right] \right\} \quad (8)$$

Pondo $\lambda(\theta) = C(\theta) \alpha(\theta)$ e substituindo a equação (8) na (7), obtém-se a expressão do fluxo de calor (Horton & Wierenga, 1983a):

$$G(z, t) = \sum_{n=1}^N \left\{ A_{0n} C \sqrt{n\omega\alpha} \exp\left(\frac{-z}{D_n}\right) \sin\left[n\omega t + \Phi_{0n} + \frac{\pi}{4} - \frac{z}{D_n}\right] \right\} \quad (9)$$

Calcular o fluxo térmico pelo método harmônico consiste em ajustar a solução dada pela equação (6) para a evolução da temperatura medida à cota z_1 , considerada como a origem para determinar $\bar{T}_t$, A_{0n} e Φ_{0n} e calcular analiticamente o fluxo de calor pela equação (9).

Análise de sensibilidade - O procedimento normalmente adotado para analisar a sensibilidade de um modelo, consiste em variar um dado de entrada, mantendo fixos os demais e verificando as variações nas saídas do modelo. Foi efetuada a análise de sensibilidade na determinação da difusividade térmica para os cinco métodos, em função de possíveis erros de posicionamento das sondas no solo, para ambas as condições de umidade, considerando deslocamentos milimétricos, nas distâncias nominais $\Delta z_{12} = 2,5 \text{ cm}$ e $\Delta z_{14} = 11,0 \text{ cm}$, até valores extremos de $\pm 1,0 \text{ cm}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evolução das medidas de temperatura, utilizadas nas determinações da difusividade térmica, mostra, claramente, ao longo de dois dias consecutivos, para as condições úmida e seca do solo, que o período fundamental P é de 24 horas, conforme esperado (Figura 1). Na condição úmida, em função da maior capacidade térmica do sistema solo-água e da maior quantidade de energia envolvida no processo de evaporação, as variações de temperatura e, em particular,

as temperaturas máximas, são menores do que na condição seca, ao longo de todo o perfil (Quadro 1).

Os valores de difusividade fornecidos pelos diferentes métodos adotados foram bastantes consistentes entre si (Quadro 2). Os vários métodos, com exceção do da fase, mostraram boa sensibilidade em relação à umidade do solo, fornecendo valores que claramente discriminam as duas condições do experimento. O

logarítmico apresentou a maior sensibilidade, com uma variação média absoluta de $5,62 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e o da fase, uma variação média absoluta de $0,89 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, pouco maior que o desvio-padrão residual do experimento ($s = 0,76 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

A dependência dos valores de difusividade em relação às distâncias utilizadas apresentaram uma

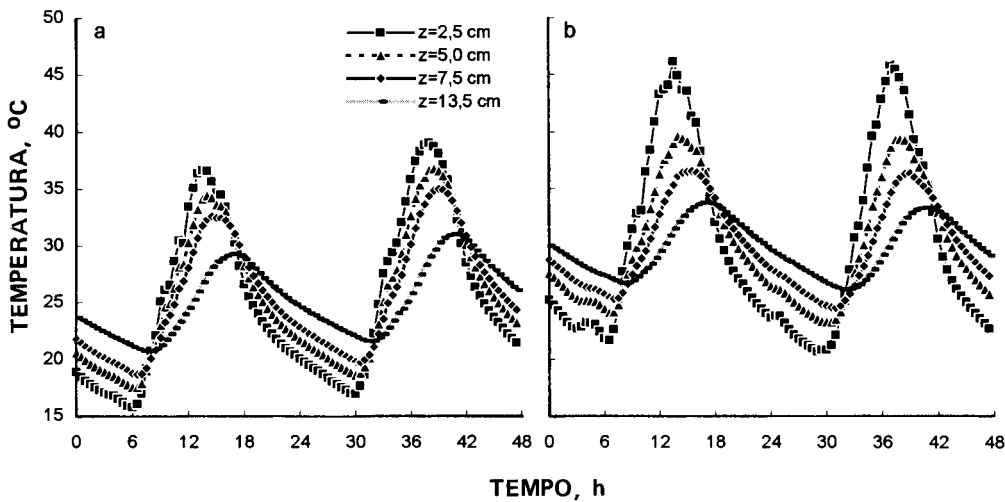


Figura 1. Evolução da temperatura do solo em condições úmida (a) e seca (b), ao longo de dois dias, em diferentes profundidades.

Quadro 1. Amplitude de temperaturas e temperatura máxima nas profundidades de 2,5, 5,0 e 13,5 cm

Profundidade	Condição úmida				Condição seca			
	Amplitude		Temp. máxima		Amplitude		Temp. máxima	
	dia 1.º	dia 2	dia 1.º	dia 2	dia 1.º	dia 2	dia 1.º	dia 2
cm	°C							
2,5	20,91	22,13	36,69	39,11	24,47	25,14	46,20	45,92
5,0	16,90	18,17	34,43	36,81	15,51	16,09	39,62	39,40
13,5	8,59	9,43	29,27	31,04	7,15	7,21	33,84	33,36

Quadro 2. Difusividade térmica de um solo em condições úmida e seca, calculada por cinco diferentes métodos utilizando-se as profundidades de $z_1 = 2,5 \text{ cm}$; $z_2 = 5,0 \text{ cm}$ e $z_4 = 13,5 \text{ cm}$

Método	Condição úmida				Condição seca			
	Δz_{12}		Δz_{14}		Δz_{12}		Δz_{14}	
	dia 1.º	dia 2	dia 1.º	dia 2	dia 1.º	dia 2	dia 1.º	dia 2
	$10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$							
Amplitude	4,62	5,39	5,56	6,05	1,01	1,05	2,91	2,81
Fase	3,06	3,06	1,31	2,57	3,06	0,76	1,31	1,31
Arco-tangente ⁽¹⁾	6,22	4,85	7,13	5,76	2,19	2,63	3,58	3,80
Logarítmico ⁽¹⁾	8,11	5,50	9,09	8,19	1,03	1,20	3,22	2,96
Harmônico ⁽²⁾	5,75	5,70	6,48	6,66	1,73	1,77	3,65	3,56

⁽¹⁾ $t_k = 6, 12, 18 \text{ e } 24 \text{ h}$. ⁽²⁾ $N = 6$ harmônicas.

variação global média absoluta de $0,96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, sendo os valores mais altos obtidos com a distância Δz_{14} . A variação média absoluta obtida na condição seca ($1,27 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) foi o dobro daquela da úmida ($0,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Com relação aos métodos individuais, o logarítmico apresentou a variação absoluta média mais elevada ($1,90 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), bastante próxima, contudo, do método da amplitude ($1,31 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), arco tangente ($1,09 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) e harmônico ($1,35 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). O método da fase, além da menor variação absoluta média ($0,86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), foi o único para o qual os valores da difusividade calculados com Δz_{14} foram menores que aqueles com Δz_{12} . Esses resultados mostram que os valores da difusividade térmica dependem, não somente das particulares condições do solo, mas, também, dos métodos e dos procedimentos de cálculo adotados.

O teste bilateral das diferenças absolutas ordenadas de Wilcoxon ("signed rank test") (Campos, 1983) mostra que não existem diferenças significativas entre os valores da difusividade térmica obtidos em dias sucessivos, sendo o mínimo nível de significância (m.n.s.) superior a 26%. Pode-se, portanto, afirmar que o conjunto de resultados – Quadro 2 – apresenta a estrutura de um delineamento experimental fatorial $2 \times 5 \times 2$ com duas repetições. A soma total dos quadrados dos desvios, em relação à média geral, pode ser algebricamente particionada nas componentes associadas aos três "fatores": condição do solo (C); método de cálculo (M) e distância entre os pontos de medida das temperaturas (D) e às corres-

Os valores de difusividade na condição úmida foram maiores que os da seca (Quadro 2). Por exemplo, o valor calculado pelo método harmônico na condição úmida com Δz_{12} foi, aproximadamente, o triplo do valor na condição seca. Vários estudos (Passerat De Silans, 1986; Antonino, 1992; Clivati & Prevedello, 1993) têm mostrado que, para baixos teores de umidade, a difusividade térmica aumenta fortemente com o aumento da umidade, atingindo um máximo e diminuindo, a seguir, suavemente.

Os valores obtidos pelo método harmônico para $\Delta z_{14} = 11,0 \text{ cm}$ foram cerca de 13% superiores aos obtidos utilizando $\Delta z_{12} = 2,5 \text{ cm}$ na condição úmida e cerca de 100% na condição seca. Isso pode ser explicado, principalmente, pela maior uniformidade da umidade ao longo do perfil, no caso úmido.

Por outro lado, cerca de 20% da variabilidade total é atribuível aos diferentes métodos de determinação da difusividade térmica, indicando a existência de importantes desvios sistemáticos entre os métodos. O teste de Friedmann mostra diferenças com m.n.s. inferior a 1%, entre os valores fornecidos por tais métodos, enquanto o coeficiente de concordância de Kendall entre os métodos apresenta m.n.s. inferior a 0,1% (Siegel, 1975). Portanto, por um lado, os valores dos vários métodos apresentam desvios significativos entre si, mas, por outro lado, tais métodos respondem, no seu conjunto, de modo coerente, às variações das características térmicas do solo em função da umidade.

Deve-se observar que esses métodos se distinguem tanto pelas hipóteses subjacentes a cada um deles, concernentes ao comportamento da temperatura na superfície, como pelas diferentes exigências em termos da quantidade de medidas a efetuar para a sua aplicabilidade. Em particular, o método harmônico é aquele que, em princípio, melhor pode ser adaptado às específicas condições experimentais, pela adequada escolha da condição ao contorno T(0,t). Contudo, é também o que exige o maior número de dados. Os outros métodos utilizam um subconjunto bastante reduzido das medidas efetuadas para a aplicação do método harmônico.

As diferentes distâncias entre os pontos de medida das temperaturas contribuem com cerca de 4,5% à variabilidade total. Essa contribuição é menor que a contribuição associada às fontes não identificadas (residuais), que corresponde a 5,8% da variabilidade total; contudo, a influência de tal distância no cálculo da difusividade térmica é fisicamente relevante, dado que depende da distribuição dos gradientes da umidade ao longo do perfil do solo. Além disso, o teste bilateral de Wilcoxon mostra diferenças significativas entre os valores calculados com as diferentes distâncias entre os pontos de medida das temperaturas, apresentando um m.n.s. inferior a 1%.

Deve-se observar que a "interação" entre as condições do solo e o método de cálculo contribui com cerca de 11% à variabilidade total, sugerindo a existência de interações entre esses "fatores". Tal fato implica a impossibilidade de estabelecer relações entre os resultados, fornecidos pelos vários métodos,

Quadro 3. Contribuição das fontes de variabilidade associadas à determinação da difusividade térmica

Fonte de variabilidade ⁽¹⁾	Soma dos quadrados dos desvios	Percentual
C	107,3218	53,05
M	41,0059	20,27
D	9,2352	4,56
C x M	22,7434	11,24
C x D	0,9425	0,47
M x D	9,0035	4,45
C x M x D	0,3115	0,15
Resíduo	11,7396	5,80
Total	202,3034	100,00

⁽¹⁾ C = condição do solo; M = método de cálculo; D = distância entre medidas de temperatura; W x Y = interação da 2.^a ordem; W x Y x Z = interação da 3.^a ordem.

pondentes "interações" da 2.^a e 3.^a ordem. Os resultados de tal partição encontram-se no quadro 3.

Como se pode observar, a condição do solo constitui a mais importante fonte de variabilidade, sendo responsável por 53% da variabilidade total, mostrando que, no seu conjunto, os métodos adotados são adequados para caracterizar a dependência do comportamento térmico do solo com a umidade.

independentemente do nível de umidade do solo. Neste contexto, no caso dos métodos logarítmico e do arco tangente, é possível, com os dados disponíveis, calcular até 12 conjuntos de valores da difusividade térmica. Apresentando tais resultados num gráfico método logarítmico-*versus*-arco tangente (Figura 2), os pontos obtidos na condição seca se situam abaixo da bissetriz do sistema de coordenadas, indicando que os valores fornecidos pelo método logarítmico são sistematicamente inferiores aos obtidos com o do arco tangente, independentemente da distância utilizada para o cálculo. Na condição úmida, por outro lado, a relação entre os valores fornecidos por ambos revela-se mais complexa, com os pontos obtidos distribuindo-se acima e abaixo da bissetriz, sendo claramente condicionada pela evolução da temperatura ao longo do dia. Tais resultados mostram claramente o efeito

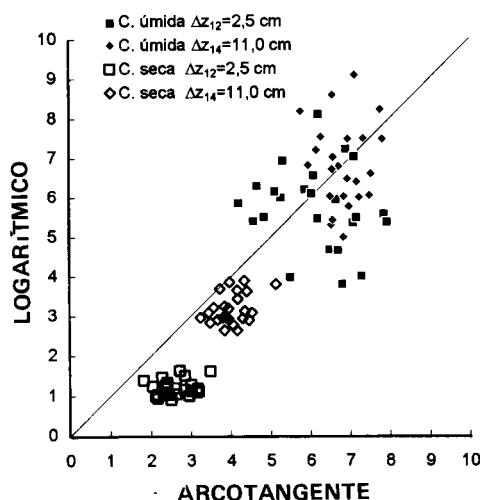


Figura 2. Relação da difusividade térmica de um solo em condições úmida e seca, calculada pelos métodos logarítmico e arco tangente.

da “interação” acima considerada. Em particular, os valores obtidos com os métodos logarítmico e do arco tangente dependem das flutuações na evolução temporal da temperatura do solo, as quais, por sua vez, refletem as condições atmosféricas de curto prazo. Ao escolher um conjunto particular de quatro temperaturas, em intervalos de seis horas, como previsto por esses métodos, é introduzido um ulterior fator de variabilidade que será tanto mais importante quanto mais rápida for a resposta do solo às flutuações térmicas exteriores.

Como foi observado, a distância entre os pontos de medida das temperaturas constitui um fator fisicamente relevante e estatisticamente significativo, porquanto concerne aos valores da difusividade térmica fornecidos pelos métodos considerados. De outro lado, vários fatores podem concorrer para que a posição efetiva das sondas no solo não correspondam às posições nominais. Quando isso acontece, os valores de Δz nominais não correspondem às distâncias efetivas entre as sondas. Assim, os valores calculados da difusividade térmica apresentarão erros sistemáticos. Os valores da difusividade térmica para todos os métodos, com exceção do harmônico, podem facilmente ser expressos como: $\alpha = F_m \Delta z^2$, onde F_m é um fator inerente a cada método, o que sugere que as variações em relação às distâncias entre as medidas das temperaturas dos valores fornecidos por tais métodos são proporcionais entre si.

Com efeito, adotando-se como índice de sensibilidade a variação relativa dos respectivos valores, todos os métodos, incluindo o harmônico, forneceram os mesmos resultados.

Na figura 3a encontram-se os valores obtidos pelo método harmônico. As posições nominais das sondas correspondem às profundidades $z_1 = 2,5$ cm, $z_2 = 5,0$ cm e $z_4 = 13,5$ cm, e a difusividade térmica foi calculada com base nas distâncias nominais $\Delta z_{12} = z_2 - z_1 = 2,5$ cm e $\Delta z_{14} = z_4 - z_1 = 11,0$ cm. Do ponto

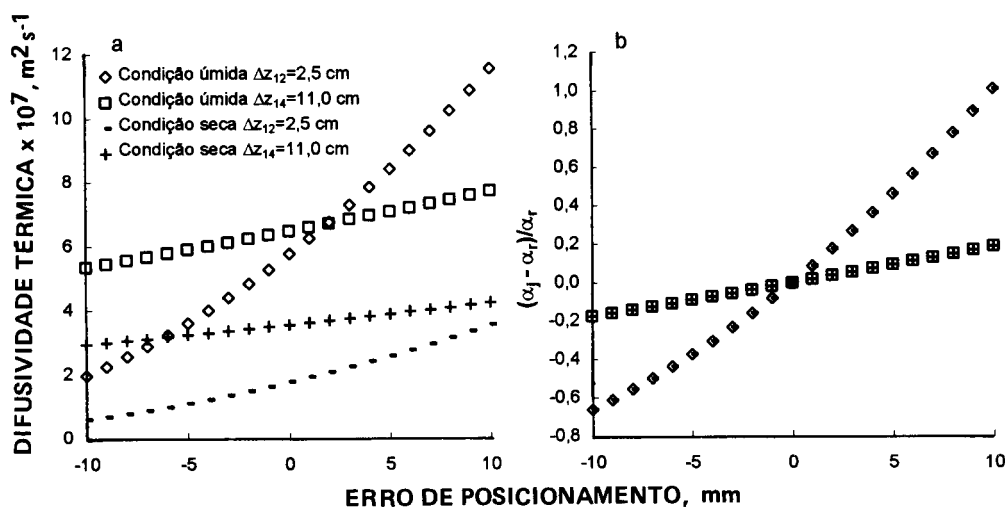


Figura 3. Variação da difusividade térmica em função de possível erro de posicionamento das sondas no solo, nas condições úmida e seca. Erro absoluto, método harmônico (a) e erro relativo, todos os métodos (b).

de vista físico, os resultados são coerentes, pois se as distâncias nominais são superiores às efetivas, os métodos identificam um aumento na amplitude térmica, resultando em maior difusividade térmica.

Os valores de tais erros dependem do nível de umidade do solo, sendo maiores, quanto mais úmido for o solo (Figura 3a). Os erros dependem, também, da distância entre os pontos utilizados para o cálculo da difusividade, aumentando, em termos absolutos, quanto maior for tal distância. Por outro lado, os erros relativos no valor da difusividade, tendo como referência o posicionamento nominal das sondas, não dependem do nível de umidade nem do método utilizado, mas somente do valor absoluto de Δz (Figura 3b). Os valores das variações da difusividade térmica, em

função de possível erro de posicionamento das sondas no solo, para os demais métodos, podem ser obtidos, utilizando-se a seguinte expressão $\alpha = \alpha_r (1 + E_r)$, onde α_r é a difusividade térmica de referência (Quadro 2) e E_r , o erro relativo.

Em particular, nas condições deste trabalho, para erros de posicionamento de ± 1 cm, a variação relativa no valor da difusividade foi de -66% e +101%, respectivamente, quando o cálculo foi efetuado por um Δz nominal de 2,5 cm, e de -17% a +19%, por um Δz nominal de 11,0 cm. Por esse resultado, portanto, poder-se-ia, em princípio, reduzir os erros sistemáticos devidos ao posicionamento das sondas, utilizando, para o cálculo de difusividade, valores experimentais obtidos para Δz maiores. Por outro lado, a utilização de valores experimentais obtidos para Δz

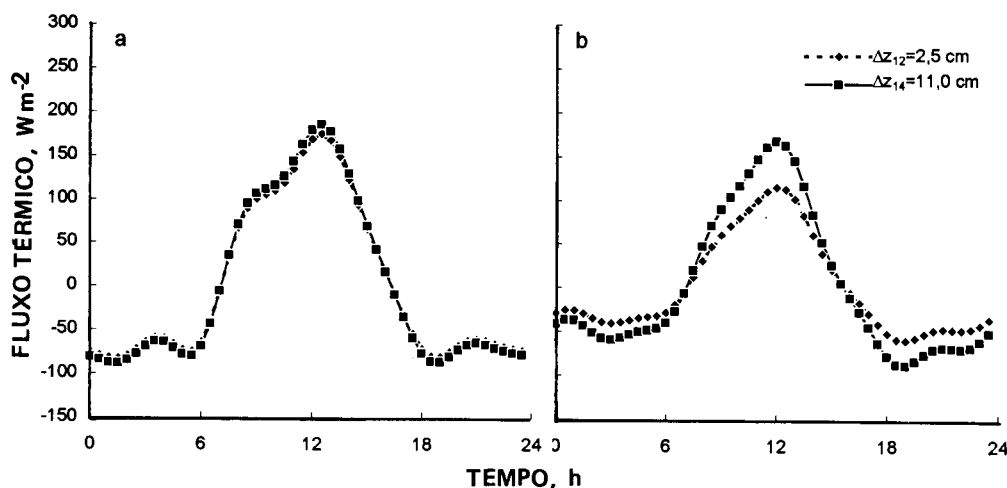


Figura 4. Evolução do fluxo térmico em função do tempo a $z = 3,0$ cm, calculado utilizando os valores de difusividade obtidos com Δz_{12} e Δz_{14} para as condições úmida (a) e seca (b), pelo método harmônico.

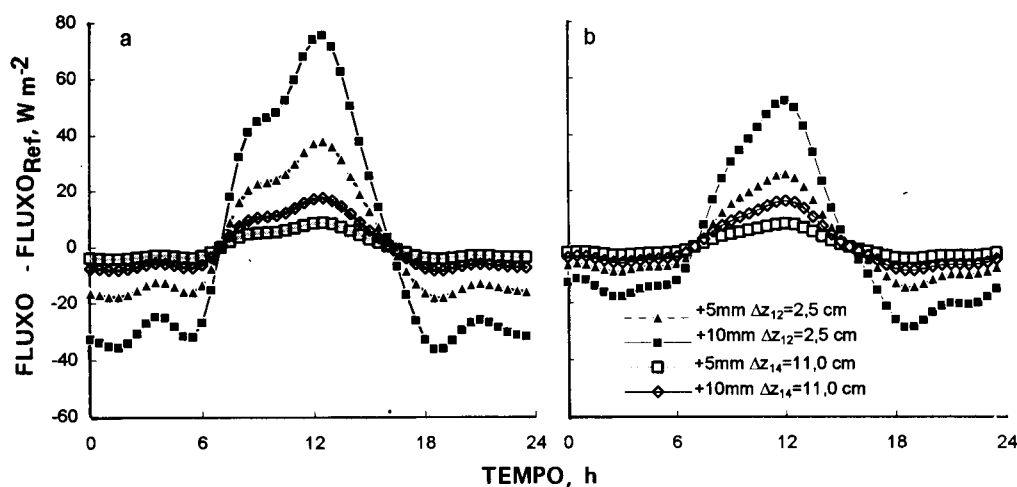


Figura 5. Diferença entre os fluxos calculados considerando erros de posicionamento de +5 mm e +10 mm e os fluxos de referência obtidos com as distâncias nominais $\Delta z_{12} = 2,5$ cm e $\Delta z_{14} = 11,0$ cm, em função do tempo para as condições úmida (a) e seca (b).

elevados implica erros sistemáticos nos cálculos do fluxo de calor na superfície.

A evolução do fluxo térmico em função do tempo a $z = 3,0$ cm, calculado utilizando os valores de difusividade obtidos com o método harmônico (Quadro 2), de $5,75 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Δz_{12}) e $6,48 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Δz_{14}) para a condição úmida, e de $1,77 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Δz_{12}) e $3,56 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Δz_{14}) para a condição seca, são apresentados na figura 4. Houve semelhança nos resultados para os fluxos na condição úmida. Para a condição seca, o fluxo calculado utilizando a difusividade obtida com $\Delta z_{14} = 11,0$ cm é bastante superior ao fluxo obtido com $\Delta z_{12} = 2,5$ cm, sobretudo no período diurno, apresentando uma diferença da ordem de 50 W m^{-2} , em torno do valor máximo.

A influência de um erro de posicionamento na determinação do fluxo térmico a $z = 3,0$ cm pode ser observada na figura 5, que apresenta a diferença entre os fluxos obtidos, considerando erros de posicionamento de $+5$ mm e $+10$ mm, isto é, distâncias efetivas $\Delta z_{12} = 3,0$ cm e $\Delta z_{12} = 3,5$ cm, e $\Delta z_{14} = 11,5$ cm e $\Delta z_{14} = 12,0$ cm e os fluxos de referência obtidos com as distâncias nominais $\Delta z_{12} = 2,5$ cm e $\Delta z_{14} = 11,0$ cm. Como esperado, as maiores diferenças foram obtidas para a distância de Δz_{12} em relação à Δz_{14} , para ambas as condições. Essas diferenças foram da ordem de 80 W m^{-2} e de 50 W m^{-2} em torno do valor máximo, respectivamente, para a condição úmida e seca.

CONCLUSÕES

1. Os estimadores de difusividade térmica obtidos pelos vários métodos mostraram-se sensíveis às condições hídricas do solo estudado, apresentando valores coerentes com tais condições. O método harmônico forneceu os estimadores de difusividade térmica mais consistentes. O da fase, valores sistematicamente mais baixos e mais dispersos, em relação aos valores fornecidos pelos outros métodos, sugerindo falta de exatidão e baixa precisão.

2. Não foi possível determinar coeficientes gerais de conversão entre os resultados dos vários métodos, porque a relação entre tais resultados dependeu das condições particulares do solo. Tal fato implica ter bastante cuidado ao comparar valores de difusividade térmica relatados em diferentes trabalhos, pois, além da influência devida às características físicas do solo em estudo, também são relevantes os métodos de medida e de cálculo adotados.

3. Os valores de difusividade térmica pelo método harmônico para $\Delta z_{14} = 11,0$ cm foram cerca de 13% superiores àqueles utilizando $\Delta z_{12} = 2,5$ cm na condi-

ção úmida e cerca de 100% na seca, influenciando fortemente o fluxo de calor estimado a $z = 3,0$ cm.

4. A determinação de difusividade térmica, empregando uma distância nominal de $2,5$ cm entre as sondas, foi bastante sensível a erros de posicionamento do sensor térmico. Portanto, a instalação de sensores térmicos, com a finalidade de estimar o fluxo de calor na superfície, deve ser bastante cuidadosa. É possível reduzir a influência de eventuais erros de posicionamento dos sensores térmicos, adotando-se maior distância entre eles, mas, assim fazendo, a maioria dos métodos considerados perde sensibilidade em relação às variações de umidade do solo.

LITERATURA CITADA

- ANTONINO, A. C. D. Modelisation des transferts de masse et de chaleur dans le systeme sol-plante-atmosphere - influence de la variabilite spatiale des caracteristiques hydrodynamiques du sol. Grenoble, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 1992. 190p. (Tese de Doutorado)
- BALABANIS, P. Caractérisation thermique des sols partiellement saturés. Application à la prédiction "in situ" du gel des couches de surface. Grenoble, Université Scientifique, Technologique et Médicale de Grenoble, 1987. 185p. (Tese de Doutorado)
- CAMPOS, H. Estatística experimental não-paramétrica. 4.ed. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP, 1983. 349p.
- CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.C. Conduction of heat in solids. 2.ed. London, Clarendon Press Oxford, 1959. 510p.
- CLIVATI, A.A. & PREVEDELLO, C.L. Determinação da difusividade térmica de meios porosos. R. bras.Ci. Solo, Campinas, 17:319-324, 1993.
- DE VRIES, D. A. Thermal properties of soils. In : VAN WIJIK, ed. Physics of plant environment. Amsterdam, North Holland, 1963. p.210-235.
- HORTON, R. & WIERENGA, P. J. Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 47:14-20, 1983a.
- HORTON, R. & WIERENGA, P. J. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 47:25-32, 1983b.
- PASSERAT DE SILANS, A. Transferts de masse et chaleur dans un sol stratifié soumis à une excitation atmosphérique naturelle. Comparaison modèle expérience. Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1986. 205p. (Tese de Doutorado)
- SIEGEL, S. Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento. 1.ed. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975. 350p.