



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Comparação de Seis Algoritmos para a Determinação da Difusividade Térmica de um Latossolo Amarelo

Willames de A. Soares¹, Antônio C. D. Antonino², José Romualdo S. Lima³, Carlos, A. B O Lira²

1- Prof. Adjunto da Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, was@poli.br;

2- Prof. Associado do Dep. de Energia nuclear – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, acda@ufpe.br; cabol@ufpe.br;

3-Prof. Adjunto da Uni. Acad. de Garanhuns – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, Pernambuco, Brasil, romualdo@uag.ufpe.br.

Artigo recebido em 14/01/2014 e aceite em 02/04/2014

RESUMO

Conhecer o perfil de temperatura do solo de uma localidade é de essencial importância na compreensão dos processos físicos que ocorrem no ambiente, sendo necessária para isto a determinação as características térmicas do solo. A capacidade térmica é bem determinada em função do conteúdo de água no solo, e, a difusividade térmica pode ser estimada por diversos métodos. Os mais utilizados para fazer esta estimativa são os algoritmos da amplitude, da fase, do arco tangente e do logaritmo. Em 2003, Gao et al. propuseram uma equação para o transporte de calor no solo incorporando a condução e a convecção térmica, o algoritmo condução-convecção. Igualmente, a difusividade térmica pode ser determinada diretamente pela solução numérica da equação de transporte de calor. Este trabalho objetivou determinar, pelos seis algoritmos (Amplitude, Fase, Condução-convecção, Arco tangente, Logaritmo e diferenças finitas), a difusividade térmica de um Latossolo Amarelo localizado na Fazenda Experimental Chã de Jardim, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, no município de Areia-PB (6°58'12"S; 35°42'15" O; 620 m). Para tal, a temperatura do solo foi medida nas profundidades de 0,02; 0,08 e 0,14 m e o conteúdo de água no solo a 0,05 m. Dentre os seis algoritmos, apenas o da fase apresentou diferenças significativas com todos os outros métodos, com resultados numericamente superiores. Pode-se observar que a difusividade térmica do solo sofreu influência da umidade volumétrica do solo, sendo possível determinar uma equação polinomial de terceiro grau para descrever tal dependência.

Palavras-chave: Temperatura do solo; Umidade do solo; Fluxo de calor no solo.

Comparison of Six Algorithms for the Determination of Thermal Diffusivity of Oxisol

ABSTRACT

Know the soil temperature profile of a locality is of essential importance in understanding the physical processes that occur in the environment, being necessary for this determination the thermal characteristics of the soil. The heat capacity is determined in function of the water content in the soil, and the thermal diffusivity can be estimated by various methods. The most used to make this estimate are the algorithms of the amplitude, phase, arc tangent and logarithm. In 2003, Gao et al. proposed an equation for the heat transport in soil by incorporating the conduction and convection thermal, the conduction-convection algorithm. In addition, the thermal diffusivity can be determined directly by numerical solution of the equation of heat transport. This work aimed to determine, by six algorithms, the thermal diffusivity of a Yellow Latosol located in Chã de Experimental Farm Garden, belonging to the Centre for agricultural sciences of Federal University of Paraíba, in the municipality of Sand-PB (6° 58 ' 12 " S; 35° 42 ' 15 " O; 620 m). To this end, the soil temperature was measured in the depths of 0.02, 0.08 and 0.14 m; and the water content in the soil the 0.05 m. Among the six algorithms, only the phase presented significant differences with all other methods, with numerically superior results. It can be observed that the thermal diffusivity of soil was influenced by soil volumetric moisture, being possible to determine a third-degree polynomial equation to describe such reliance.

Keywords: Soil temperature; Soil moisture; Heat flow in soil.

Introdução

Soares, W.A.; Antonino, A. C. D.; Lima, J. R. S.; Lira, C. A. B. O.

O conhecimento e análise do balanço de energia na superfície do solo são de fundamental importância na modelagem dos processos hidrológicos, agroecológicos e atmosféricos. Entre os quatro principais componentes do balanço de energia, o fluxo de calor no solo (G) é de particular interesse, uma vez que enquanto o saldo de radiação e os fluxos turbulentos podem ser medidos na camada atmosférica, os sensores utilizados na determinação do G têm de ser instalados no interior do solo, em uma determinada profundidade a fim de evitar flutuações decorrentes dos processos atmosféricos à superfície (Gao, 2005; Holmes et al., 2008; Wang e Bou-Zeid, 2011, 2012).

Quando os fluxos turbulentos são estimados em vez de medidos, o cálculo do fluxo de calor no solo deve ser mais preciso, já que o mesmo regula o perfil de temperatura do solo e afeta a determinação dos fluxos radiativos e turbulentos. Entretanto, o G pode ser estimado a partir das características térmicas do solo (Soares, 2013).

A acurácia é aumentada a partir do conhecimento das propriedades térmicas do solo que podem ser obtidas do estudo da distribuição da temperatura no perfil do solo. Isto requer a solução da equação da transferência de calor. Esta solução depende da formulação das condições de contorno bem como das propriedades térmicas do solo, que são representadas pela difusividade, capacidade e condutividade térmica aparente (Gnatowski, 2009).

A difusividade térmica aparente pode ser determinada sob condições de campo pela variação da temperatura do solo a certas profundidades (Horton et al., 1983). Esses métodos são muito atrativos uma vez que apenas medidas de temperaturas são necessárias. Entretanto, eles são limitados para camadas uniformes de solo. Os valores de difusividade térmica aparente também podem ser determinados pela razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica.

Uma forma de determinar a difusividade térmica aparente do solo é discretizar a equação unidimensional de transferência de calor, e, a partir de uma série

de dados de temperatura do solo, a algumas profundidades, determina-la. A principal desvantagem decorre em se ter pelo menos três profundidades monitoradas.

Algumas metodologias para a determinação da difusividade térmica do solo podem ser agrupadas conforme as condições admitidas para a sua solução. No primeiro grupo a solução analítica da equação da condução de calor impõe condições de fronteira que podem ser representadas por uma função sinusoidal da temperatura na superfície do solo (método da amplitude, fase). No segundo as soluções estão baseadas na hipótese que a temperatura na superfície do solo pode ser estimada como uma série de senos e cossenos (método do arco tangente, método logaritmo). A principal desvantagem dessas metodologias está na necessidade de uma grande acurácia na determinação da temperatura em pelo menos duas profundidades, uma vez que a difusividade térmica é calculada para camadas de solo.

A fim de superar as dificuldades apontadas pelas metodologias anteriores, Gao et al. (2003) desenvolveram um simples algoritmo para estimar com precisão a difusividade térmica do solo, baseado na resolução analítica da equação unidimensional de condução-convecção, encontrando um algoritmo. Este algoritmo ainda é pouco avaliado, sobretudo para regiões do Nordeste do Brasil.

Oliveira et al. (2010) estudando o comportamento térmico de um Neossolo Regolítico de textura arenosa em Campina Grande-PB, em dois períodos do ano, verificaram que, para a camada superficial as temperaturas no período seco apresentaram valores mais elevados que as observadas nos períodos intermediário e chuvoso, já para a camada mais profundas as temperaturas no período chuvoso foram superiores as observadas nos outros dois períodos. Eles também observaram que o modelo de estimativa da difusividade térmica, tanto pelo método da amplitude como pelo método da fase, apresentou maior coerência nas camadas mais superficiais, para os períodos estudados.

O objetivo deste trabalho é comparar os valores médios para a difusividade térmica

determinada por seis algoritmos (Amplitude, Fase, Condução-convecção, Arco tangente, Logaritmo e diferenças finitas), de um Latossolo Amarelo cultivado com mamona, no município de Areia-PB, utilizando dados de umidade e temperatura do solo.

Material e Métodos

Descrição da área experimental (dados)

Os dados utilizados no estudo foram obtidos entre os meses de abril a outubro de 2007 em um plantio de mamona, em uma área de 4 ha da Fazenda Experimental Chã de Jardim, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, no município de Areia, situado na microrregião do Brejo Paraibano, a 6°58'12"

S e 35°42'15" O, com altitude de aproximadamente 620 m. O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo As' (quente e úmido), com estação chuvosa no período outono-inverno, com maiores precipitações nos meses de Junho e Julho (Brasil, 1972).

O solo da área é classificado, de acordo com EMBRAPA (2006), como Latossolo Amarelo (Tabela 1). A camada de solo entre a superfície e 40 cm de profundidade apresenta classificação textural Franco Argilo Arenosa (Lima, 2004). A fração areia foi obtida por peneiramento e as frações de argila e de silte foram determinadas por sedimentação, após dispersão com hexametáfosfato de sódio, utilizando-se o método do densímetro (EMBRAPA, 1997).

Tabela 1. Análise granulométrica, classificação textural e densidade do solo da área experimental

Profundidade (m)	Granulometria (g kg ⁻¹)			Classificação textural *	Densidade do solo
	Areia	Silte	Argila		
0,00 – 0,20	628,9	140,7	230,4	Franco argilo arenosa	1,28
0,20 – 0,40	558,2	140,8	301,0		1,33

Elaboração: autores.

A temperatura do solo foi medida nas profundidades de 0,02; 0,08 e 0,14 m, por meio de termistores (108-L, Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah, USA). A umidade do solo foi observada a 0,05 m de profundidade, utilizando um sensores de umidade volumétrica (sensor do tipo time-domain-reflectometry-TDR, CS 615, Campbell scientific, USA). As medidas foram coletadas a cada minuto e armazenadas em média de 30 minutos por um datalogger (CR 10x, Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah, USA).

O período de realização do estudo foi de 01/04/2007 a 31/10/2007, totalizando 213 dias, onde foram calculados as médias mensais a partir dos valores dos dados de meia em meia hora.

Equação da condução de calor clássica para a temperatura do solo

A condução de calor unidimensional no solo é descrita pela equação:

$$C \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo t o tempo, x a coordenada de posição, T , λ , e C , representam, a temperatura, a condutividade térmica, e a capacidade térmica volumétrica do solo, respectivamente. Considerando que a camada superficial do solo (0,00 – 0,20 m) em estudo é homogênea, possuindo composição, densidade, umidade e porosidade constantes, a equação 1 pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que a difusividade térmica (α) é igual ao quociente entre a condutividade e a capacidade térmica volumétrica do solo. Essa equação considera que a difusividade térmica do solo é independente do tempo e do espaço (Clivati & Prevedello, 1993).

A difusividade térmica aparente pode ser estimada utilizando uma série de medidas de temperatura no solo, por meio de diversas metodologias. Neste trabalho, a difusividade térmica da camada superficial do solo foi estimada, por meio dos algoritmos da amplitude, fase, condução-convecção, arco tangente, logaritmos e diferenças finitas.

Algoritmo Amplitude

Trata-se de um modelo simplificado, que nos fornece uma boa ideia do compartimento da temperatura num perfil de solo. A temperatura na superfície pode ser descrita por uma função senoidal, do tipo:

$$T(0, t) = \bar{T} + A \sin(\omega t + \Phi) \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo \bar{T} a temperatura média na superfície do solo, A a amplitude da oscilação, Φ a fase da onda térmica e ω a velocidade angular de rotação da Terra. A temperatura do solo (T) a profundidade z pode ser calculada por:

$$T(z, t) = \bar{T} + A e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \sin\left(\omega t - z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} + \Phi\right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Aplicando-se a equação 4 em duas profundidades (z_1 e z_2), pode-se estimar (α) pela equação:

$$\alpha = \frac{\omega(z_2 - z_1)^2}{2 \left[\ln \frac{A(z_1)}{A(z_2)} \right]} \quad (\text{Eq. 5})$$

Algoritmo Fase

A partir do intervalo entre as ocorrências das temperaturas máximas do solo, nas profundidades z_1 e z_2 , é possível determinar (α) pelo algoritmo da fase, por meio da equação:

$$\alpha = \frac{1}{2\omega} \left(\frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right)^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

Algoritmo Condução-Convecção

Gao et al (2003) propuseram uma equação para o transporte de calor no solo incorporando a condução e a convecção térmica, onde a α pode ser estimada pela equação:

$$\alpha = \frac{(z_1 - z_2)^2 \omega \ln(A_1/A_2)}{(\Phi_1 - \Phi_2)[(\Phi_1 - \Phi_2)^2 + \ln^2(A_1/A_2)]} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo $A_1(A_2)$, $\Phi_1(\Phi_2)$ e $\bar{T}_1(\bar{T}_2)$ a amplitude, a fase e a Temperatura média do solo à profundidade $z_1(z_2)$.

Algoritmo Arco Tangente

A temperatura na superfície do solo pode ser descrita por uma série de Fourier

$$T(0, t) = \bar{T} + \sum_{i=1}^n [a_i \sin(i\omega t) + b_i \cos(i\omega t)] \quad (\text{Eq. 8})$$

Sendo n o número de harmônicas e a_i e b_i as amplitudes. Para duas harmônicas a difusividade térmica aparente pode ser determinada a partir de medidas de temperatura em duas profundidades pela equação:

$$\alpha = \frac{\omega(z_1 - z_2)^2}{2 \left\{ \arctg \left[\frac{(T_1 - T_3)(T_2' - T_4') - (T_2 - T_4)(T_1' - T_3')}{(T_1 - T_3)(T_1' - T_3') + (T_2 - T_4)(T_2' - T_4')} \right] \right\}^2} \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde $T_1(T_1')$, $T_2(T_2')$, $T_3(T_3')$ e $T_4(T_4')$ são medidas da temperatura do solo à profundidade $z_1(z_2)$, com incrementos temporais de 6 horas.

Algoritmo Logaritmo

Assumindo as mesmas considerações do algoritmo arco tangente, α pode ser expresso como:

$$\alpha = \left[\frac{0,0121(z_1 - z_2)}{\ln \left[\frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T_1' - T_3')^2 + (T_2' - T_4')^2} \right]} \right]^2 \quad (\text{Eq. 10})$$

Diferenças Finitas

A difusividade térmica aparente também pode ser calculada utilizando a técnica das diferenças finitas, que fornece estimativas ao longo do ciclo térmico diurno. Ela é estimada por:

$$\alpha = \frac{\frac{T_i^{j+1} - T_i^{j-1}}{2\Delta t}}{\frac{T_{i-1}^j - 2T_i^j + T_{i+1}^j}{(\Delta Z)^2}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo Δt e ΔZ os incrementos de tempo e profundidade, T a temperatura do solo. Os índices j e i referem-se à posição e ao tempo, respectivamente. Para estimar α foram utilizados os dados de temperatura observados nas profundidades de 0,02 m, 0,08 m e 0,14 m ($\Delta Z = 0,06\text{m}$), e o incremento de tempo de 1800 s. Na utilização desta metodologia deve-se observar a sua estabilidade numérica, que é garantida quando:

$$\frac{\alpha \Delta T}{(\Delta Z)^2} < 0,5 \quad (\text{Eq. 12})$$

Análise estatística

Embora não se possa dizer qual o método mais se aproxima dos valores reais da difusividade térmica do solo, é possível determinar dentre as estimativas pelas diferentes metodologias, quais apresentam resultados semelhantes, e, quais apresentam diferenças significativas entre os valores estimados.

Assim sendo, as diferenças entre as estimativas da difusividade térmica do solo pelos seis algoritmos foram determinadas usando o teste ANOVA e, para se verificar quais médias apresentaram diferenças significativas, foi utilizado o teste de Tukey, ambos a 1% de probabilidade.

Resultados e Discussão

O mês de abril apresentou a menor média mensal de umidade do solo no período, com valores inferiores a 0,01 m³ m⁻³ e os meses de junho e agosto apresentam os maiores valores, com 0,192 e 0,195 m³m⁻³, respectivamente (Figura 1).

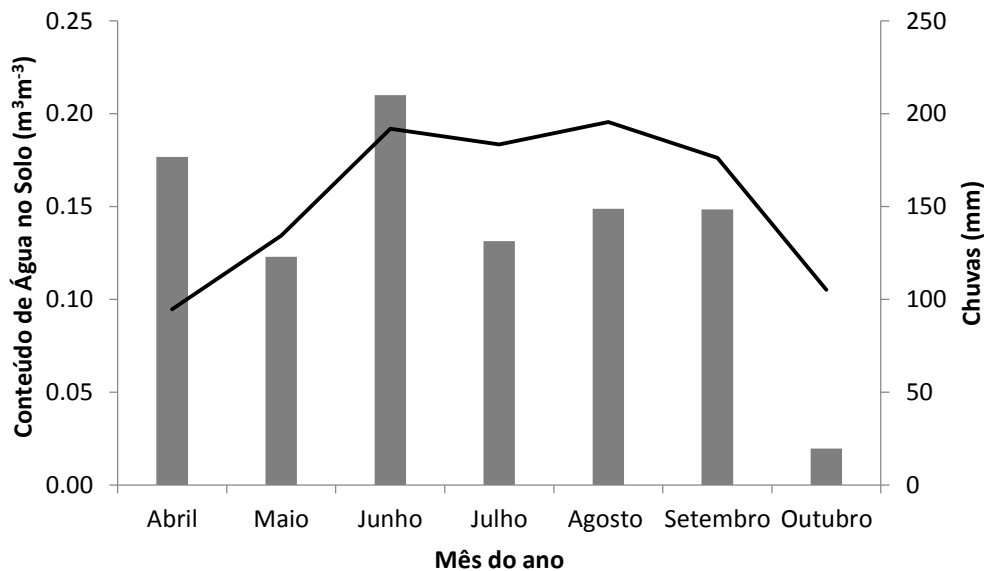


Figura 1. Chuva (■) e conteúdo de água no solo (-), na profundidade de 0,05 m, nos meses de abril a outubro.

As médias mensais dos dados de temperatura do solo foram obtidas a partir dos dados coletados nas profundidades de 0,02, 0,08 e 0,14 m. A amplitude da temperatura do

solo decresce com a profundidade, como pode ser visto na Figura 2. A temperatura encontrada a 0,02 m mais fria foi encontrada durante a madrugada do mês de julho, e, a

mais quente, às 13 horas do mês de novembro. Claramente existe uma relação entre a umidade do solo e a temperatura. Os meses mais quentes correspondem aos

menores teores de umidade no solo, provavelmente pela menor cobertura do solo. O inverso ocorre no mês de junho teve a menor temperatura e maior umidade.

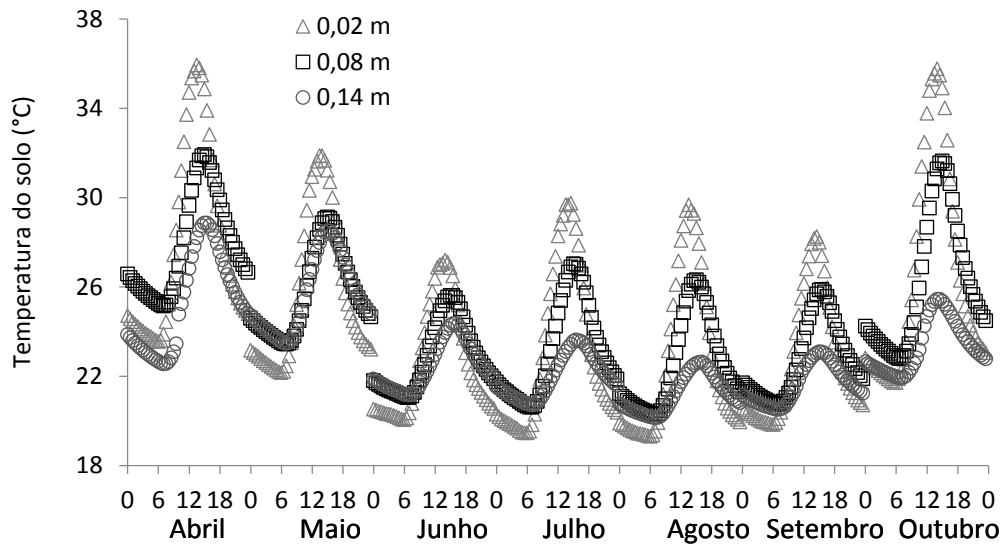


Figura 2. Média horária mensal da temperatura do solo medida a 0,02, 0,08 e a 0,14 m de profundidade, nos meses de abril a outubro de 2007.

A difusividade térmica do solo sofreu influência da umidade do solo, crescendo entre os meses de abril a junho, decrescendo de junho a agosto e voltando a crescer de agosto a outubro, como pode ser observado na Figura 3. Esses resultados estão de acordo com o estudo de Silans et al. (2006) onde a difusividade térmica do solo foi expressa por meio de um polinômio de terceiro grau, função da umidade.

O algoritmo da fase apresentou resultados numericamente superiores aos calculados pelos outros algoritmos, principalmente nos meses de junho, setembro e outubro. Apenas no mês de maio o algoritmo das diferenças finitas superou o valor estimado pelo algoritmo da fase. Resultados semelhantes foram encontrados por Wang et al. (2010), ao comparar algoritmos de determinação da difusividade térmica em um solo argiloso, sob as mesmas condições de temperatura. Eles observaram que o algoritmo da Fase apresentou resultados superiores aos determinados pelos outros algoritmos.

Os valores máximos, mínimos e médios de α calculados pelos seis algoritmos estão apresentados na Tabela 2. O menor valor foi de $2,24 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ encontrado pelo algoritmo das diferenças finitas, para o mês de abril. O valor máximo foi de $19,10 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ encontrado pelo algoritmo da Fase, no mês de junho. Os valores estimados para a difusividade térmica do solo estiveram na mesma ordem de grandeza dos encontrados, entre $5,9$ a $80,7 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, estimados pelo algoritmo da amplitude em Campina Grande – PB (Oliveira et al., 2010) e entre $4,9$ e $22,5 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ em um Planossolo Háplico, no norte do Pantanal (Danelichen e Biudes, 2011).

A média da profundidade de amortecimento para a camada de 0,00-0,08m obtida pelos seis métodos e estão apresentadas na Tabela 2. Estes valores estão muito próximos dos encontrados um Latossolo Amarelo distrófico (0,14m), na cidade de Salvador, por Rao et al. (2005).

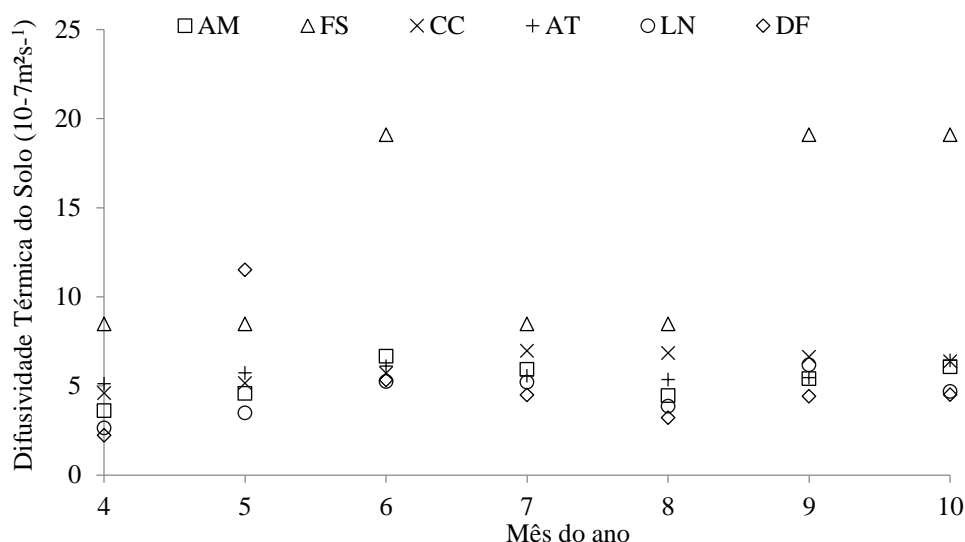


Figura 3. Variação temporal da difusividade térmica do solo, entre linhas, estimadas pelos algoritmos Amplitude (AM), Fase (FS), Condução-Convecção (CC), Arco tangente (AT), Logaritmo (LN) e Diferenças Finitas (DF) entre os meses de Abril a Outubro de 2007.

Após a aplicação do teste ANOVA, pôde-se concluir que os algoritmos apresentam diferenças significativas entre os valores médios apresentados. As difusividades térmicas do solo calculadas pelos algoritmos da amplitude, arco tangente,

condução-convecção, logaritmo e diferenças finitas não diferiram entre si. O algoritmo da fase apresentou diferenças significativas com todos os outros métodos.

Tabela 2. Valores mínimos, máximos e médios da difusividade térmica do solo (α) e média da profundidade de amortecimento (D), calculados pelos seis algoritmos, na camada de 0,02 a 0,08 m de profundidade.

Algoritmo	α ($10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)			D (m)
	Mínima	Máxima	Média	Média
Amplitude	3,61	6,68	5,25 ^a	0,12 ^c
Fase	8,49	19,10	13,04 ^b	0,19 ^d
Arco Tangente	5,13	6,44	5,68 ^a	0,12 ^c
Condução-convecção	4,60	6,98	6,04 ^a	0,13 ^c
Logaritmo	2,64	6,19	4,48 ^a	0,11 ^c
Diferenças Finitas	2,24	11,51	5,11 ^a	0,11 ^c

Elaboração: autores.

* Os índices de mesma letra indicam que não houve diferença significativa ($p < 0,001$)

Dentre os algoritmos presentes este estudo, a melhor relação entre α e θ foi encontrada pelo algoritmo das diferenças finitas, com um bom nível de ajuste ($r^2 = 0,85$), sendo possível estimar a difusividade

térmica (m^2/s) em função da umidade volumétrica, em porcentagem por:

$$\alpha = 4,8 \cdot 10^{-3} \theta^3 - 2,4 \cdot 10^{-3} \theta^2 + 4,0 \cdot 10^{-4} \theta - 2,0 \cdot 10^{-5} \quad (\text{Eq. 13})$$

No mês de abril, que foi o de menor umidade média no solo, cinco dos seis algoritmos estimaram os valores de α em uma faixa estreita de valores, que vão de $2,24 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ até $5,13 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Considerações Finais

A difusividade térmica é um parâmetro fundamental para os estudos dos processos térmicos do solo. Neste estudo, a difusividade térmica foi quantificada por seis diferentes metodologias (amplitude, fase, arco Tangente, condução-convecção, logaritmo, diferenças finitas), e, apenas o algoritmo da fase apresentou diferenças significativas quanto aos valores apresentados pelos outros algoritmos, ao longo de todo o período de estudo.

Os valores da difusividade térmica foram influenciados pela umidade volumétrica do solo, sendo possível determinar uma equação matemática para descrever tal dependência.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo no 484189/2011-5), pela concessão de recursos financeiros.

Referências

Brasil. 1972. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e fertilidade do Solo. Divisão de Agrologia – SUDENE. Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. (Boletim Técnico,15). Rio de Janeiro. 670p.

Clivati, A.A. & Prevedello, C.L. 1993. Determinação da difusividade térmica de meios porosos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.17, n.3 p.319-324.

Danelichen V. H. Biudes, M. S. 2011. Avaliação da difusividade térmica de um solo no norte do pantanal, *Ciência e Natureza*, 33 (2), 227-240.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 306p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 212 p.

Gao, Z.Q., 2005. Determination of soil heat flux in a Tibetan short-grass prairie. *Boundary-Layer Meteorol.* 114, 165–178.

Gao, Z., Fan, X., and Bian, L. 2003. An analytical solution to one-dimensional thermal conduction convection in soil, *Soil Sci.*, 168, 99–107.

Gnatowski, T. 2009. Analysis of thermal diffusivity data determined for selected organic. . , *Land Reclamation*, Vol.41, N.2, p. 95-108.

Holmes, T.R.H., Owe, M., De Jeu, R.A.M., Kooi, H. 2008. Estimating the soil temperature profile from a single depth observation: a simple empirical heatflow solution. *Water Resour. Res.* 44, W02412.

Horton R., WIERENGA P. J., NIELSEN D. R. 1983. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 47: 25-32.

Lima, J. R. S. 2004. Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do brejo paraibano. 2004. 167 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

Oliveira, S.S.; Fideles Filho, J.; Oliveira, S.V.; Araújo, T.S. 2010. Difusividade térmica do solo de Campina Grande para dois períodos do ano. *Revista de Geografia*, v.27, n.2, 197-189.

Rao, T. V. R., Silva, B. B., Moreira, A. A. 2005. Caracterização térmica do solo em Salvador, BA. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, n 4, p. 554-559.

Silans, A.P.; Silva, F.M.; Barbosa, F.A.R. 2006. Determinação in loco da difusividade térmica num solo da região de caatinga (PB), Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.30, p.41-48.

Soares, W. A. 2013. Análise Comparativa do Fluxo de Calor no Solo em Profundidade e na

Superfície. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, n 4, p.665-679.

Wang, Z. H.; Bou-Zeid, E. 2012. A novel approach for the estimation of soil ground heat flux. Agricultural and Forest Meteorology 154– 155 214– 221.

Wang, L.; Gao, Z., Horton, R. 2010. Comparison of six algorithms to determine the soil apparent thermal diffusivity at a site in the loess plateau of china. Soil Science 175, 51-60.