

## **MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UM NEOSOLO REGOLÍTICO DO AGRESTE MERIDIONAL PERNAMBUCANO**

d.o.i. 10.13115/2236-1499v2n19p455

Marco Aurélio Calixto Ribeiro de Holanda (UPE)<sup>1</sup>

Willames de Albuquerque Soares (UPE)<sup>2</sup>

**Resumo:** Saber a respeito da temperatura do solo de determinado lugar é importante para entender os processos que ocorrem no ambiente e, assim, dar suporte às culturas agrícolas, visto que a temperatura é um parâmetro restritivo à germinação e desenvolvimento de algumas plantas. Para saber a respeito da transferência de calor no solo, classificado como neossolo regolítico, nas camadas de 0,00 a 0,50 m de profundidade, utilizou-se o método das diferenças finitas para criar um modelo computacional, visando descobrir a variação da temperatura nestas diferentes camadas do solo. Para validar o modelo proposto foi utilizado o erro quadrático médio, confrontando os dados obtidos com os dados aferidos no campo. A aplicação do método das diferenças finitas na equação da transferência de calor rendeu resultados satisfatórios para o fluxo de calor no solo do Agreste Meridional pernambucano, com valores determinados muito semelhantes aos aferidos *in loco*. Assim, o solo avaliado pode ser caracterizado como de alta difusividade térmica. O uso do modelo criado a partir da discretização implícita do método das diferenças finitas facilita a

---

<sup>1</sup> Aluno da Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, E-mail: [Holandamacr@yahoo.com.br](mailto:Holandamacr@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Professor Adjunto da Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

realização de estudos futuros para estimar o fluxo de calor em profundidades maiores, sem o auxílio da coleta de dados em camadas mais profundas do solo.

**Palavras-chave:** erro quadrático médio; diferenças finitas; temperatura do solo.

**Abstract:** Knowing the soil temperature of a particular place is important to understand the processes that occur in the environment and thus support agricultural crops, since the temperature is a parameter restrictive to the germination and development of some plants. To know about soil heat transfer, classified as a regolith neosol, in the 0.00 to 0.50 m depth layers, the finite difference method was used to create a computational model, aiming to discover the variation of the temperature in these different layers of soil. To validate the proposed model, the mean square error was used to compare the data obtained with the field data. The application of the finite difference method to the heat transfer equation yielded satisfactory results for soil heat flux in the Agreste Meridional region of Pernambuco, with values very similar to those measured in loco. Thus, the evaluated soil can be characterized as having high thermal diffusivity. The use of the model created from the implicit discretization of the finite difference method facilitates the realization of future studies to estimate the heat flux in larger depths, without the aid of data collection in deeper layers of the soil.

**Keywords:** root mean square error; finite difference; soil temperature

## 1. Introdução

A busca por informações derivadas da temperatura do solo é fundamental para o conhecimento detalhado da transferência de calor sob diferentes coberturas vegetais, além de explicar os vários processos químicos, físicos e biológicos nos diversos tipos de ecossistema

*Modelagem da Transferência de Calor... Holanda & Soares*  
existentes no planeta (HILLEL, 2004). Deste modo, a temperatura absorvida pelo solo influenciará no ambiente, definindo e moldando o bioma em que estará presente.

Além disso, o fluxo de calor no solo é importante pois afeta o regime térmico do solo, que por sua vez, exerce uma substancial influência em várias atividades biológicas das plantas, tais como: germinação, emergência das mudas, crescimento inicial, maturação e produção (POULOVASSILIS et al., 1998)

Deste modo, a temperatura é considerada um fator importante que está diretamente relacionado ao sistema solo-planta-atmosfera, afetando três funções importantes do solo: a biológica, a química e a física. Nas plantas, ela influencia grandemente o processo de germinação e emergência, bem como, o crescimento das raízes (NETO, 2011).

A temperatura do solo varia em função das mudanças ocorridas nos processos de troca de energia, as quais ocorrem principalmente na superfície do solo. Os efeitos desses fenômenos são propagados dentro do perfil do solo por uma complexa série de processos de transporte, sendo que as taxas desses transportes são afetadas pelas propriedades do solo, as quais são variáveis no tempo e no espaço. Deste modo, a formulação quantitativa e a predição do regime térmico do solo assumem uma grande importância.

O fluxo de calor e a difusividade térmica do solo são importantes componentes do balanço de energia de superfície, particularmente para regiões áridas e semiáridas (SANTOS, 2014), sendo assim, os índices de temperatura de um determinado lugar são fatores fundamentais na descrição climática do mesmo.

A busca por informações a respeito dessas características é importante para o detalhamento e modelagem da transferência de calor e da sua ligação com o vapor de água e com a água líquida entre as diferentes camadas do solo, o que está diretamente relacionado às propriedades climáticas e geográficas do local de estudo (BITTELLI et al., 2008; CARVALHO et al., 2013).

Embora se obtenham resultados mais precisos em relação aos métodos analíticos, a determinação de propriedades térmicas no solo por métodos laboratoriais que requer equipamentos especializados como sensores e termopares, aumentando os custos das análises. Nesse contexto, a opção por métodos analíticos e estimativas para a determinação das propriedades térmicas do solo é uma boa alternativa, principalmente em função da praticidade em relação aos procedimentos laboratoriais e pela obtenção de resultados satisfatórios (CARVALHO et al., 2013).

Assim, objetivou-se realizar a caracterização térmica de um solo do agreste meridional de Pernambuco utilizando um método numérico (estimativas), método das diferenças finitas, a fim de obter informações

*Modelagem da Transferência de Calor... Holanda & Soares*  
com a mesma precisão e reduzir o custo atrelado a aquisição de informações.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1 Caracterização da área e do material de estudo**

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos no ano de 2011 em uma área localizada no município de São João, a 220 km de Recife, e faz parte da mesorregião do Agreste e microrregião Garanhuns, no Agreste Meridional de Pernambuco. O local de coleta dos dados está localizado nas coordenadas geográficas Latitude 08° 52' 32" Sul e Longitude 36° 22' 00" Oeste, com altitude de 716 m e apresenta as seguintes características climáticas: precipitação pluviométrica média anual 579,1 mm, temperatura média anual em torno de 21 °C. O clima predominante da área de estudo é do tipo As, conforme classificação de Koppen, e apresenta-se como tropical chuvoso com verão seco (BELTRÃO et al., 2005) e o solo é predominantemente do tipo neossolo regolítico (ALMEIDA et al., 2015).

A temperatura no solo foi medida nas profundidades de 0,02; 0,08; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m. As medidas foram realizadas por meio de termopares (108-L, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) e coletadas e armazenadas numa frequência de 30 minutos por

*Modelagem da Transferência de Calor... Holanda & Soares*  
um *datalogger* (CR 10x, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) para minimizar o erro gerado por fatores naturais que interferem na aferição correta dos valores. O processo de calibração do termopar consistiu em fazer medições da força eletromotriz gerada para diversos valores conhecidos de temperatura da junção de medida.

Após a coleta dos dados, realizou-se o tratamento dos mesmos utilizando a discretização implícita do método das diferenças finitas aplicado à equação da transferência de calor.

## **2.2 Discretização do método**

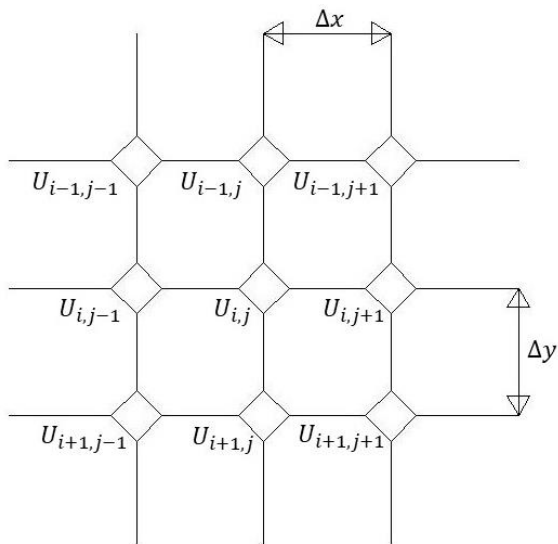
A primeira etapa para resolução de qualquer método numérico envolvendo as equações diferenciais parciais, EDP, é discretizar a região onde se procura a solução. Para a discretização define-se uma malha, que é um conjunto finito de pontos pertencentes ao domínio, chamados nós da malha (FERREIRA & LIMA, 2010).

A discretização consiste em encontrar valores para preencher as lacunas dos dados de temperatura nas profundidades estimadas, o que acarretou na escolha do método das diferenças finitas, visto que necessita apenas de valores de contorno superiores e inferiores previamente coletados. Deste modo, valeu-se das medições da primeira e da última profundidade como parâmetros, ou seja, como limites inferior e superior, respectivamente, para realizar a interpolação, a fim

*Modelagem da Transferência de Calor... Holanda & Soares*  
 de espaçar igualmente as profundidades e estimar as respectivas  
 temperaturas (SILANS et al., 2006; NOWAMOOZ et al., 2015).

Para tal, foi utilizada a malha bidimensional genérica (Figura 1)  
 para realizar a discretização implícita do método das diferenças finitas  
 aplicado à equação da transferência de calor (Equação 1), considerando  
 que a camada do solo a ser estudada (0.00 - 0.50 m) é homogênea.

**Figura 1.** Malha bidimensional genérica.



$$\frac{\partial U}{\partial t} = k \frac{\partial U^2}{\partial z^2} \quad (1)$$

Onde  $t$  compreende ao tempo,  $z$  a coordenada da posição,  $U$  a temperatura e  $K$  a difusividade térmica do solo (SOARES et al., 2014),

$\frac{\partial U}{\partial t}$  corresponde ao diferencial central e  $\frac{\partial U^2}{\partial z^2}$  ao diferencial de segunda ordem descritos na Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

$$\frac{\partial U}{\partial t} \approx \frac{U_{ij} - U_{ij-1}}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial U^2}{\partial z^2} \approx \frac{U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i+1,j}}{\Delta z^2} \quad (3)$$

Ao substituir as Equações 2 e 3 na Equação 1, obtém-se:

$$\frac{U_{ij} - U_{ij-1}}{\Delta t} = k \frac{U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i+1,j}}{\Delta z^2} \quad (4)$$

se os termos  $K$ ,  $\Delta t$  e  $\Delta z^2$  forem isolados, de modo que  $\frac{k\Delta t}{\Delta z^2} = \alpha$ , encontra-se a Equação 5:



$$U_{ij} - U_{ij-1} = \alpha [(U_{i-1j} - 2U_{ij} + U_{i+1j})] \quad (5)$$

A partir da Equação 5, torna-se viável a aquisição dos dados, como as condições de contorno inferior e superior para cada dia analisado, a partir dos dados brutos coletados. Para tal análise, foi utilizado o programa MATLAB<sup>®</sup> versão R2014b, visando facilitar e conferir confiabilidade aos cálculos dos valores interpolados.

Os dados obtidos através do software expressam apenas um único dia de amostragem, sendo insuficiente para se inferir qualquer informação a respeito das características térmicas do solo. Deste modo, os resultados das simulações de sete dias consecutivos foram concatenados para que fosse possível analisar o contexto de tais características do solo para obter resultados expressivos.

### **2.3 Erro Quadrático Médio**

Para analisar se os dados, calculados através do MATLAB<sup>®</sup>, são condizentes com os valores de temperatura coletados, utilizou-se o erro quadrático médio, EQM, descrito na Equação 6, a seguir.

$$EQM = \sum_{i=0}^n \left[ \frac{(Yc - Ym)^2}{n} \right] \quad (6)$$

Onde Yc compreende aos valores encontrados numericamente, Ym aos valores coletados em campo com o termopar e n à quantidade de termos utilizados.

### 3. Resultados e Discussão

Ao se analisar os dados de temperatura provenientes das simulações realizadas, foi possível calcular os valores do erro quadrático médio para cada profundidade, em cada dia, os quais estão presentes na Tabela 1.

**Tabela 1.** Erro quadrático médio diário (EQM) da profundidade do solo analisado no município de São João-PE

Dia	EQM/Profundidade (m)						
	0,02	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	10,004	8,237	5,106	4,140	3,889	3,954	3,876
2	8,820	6,569	5,832	3,962	3,577	3,615	3,640
3	8,482	6,671	5,497	4,048	3,711	3,378	3,287
4	8,153	7,384	3,572	3,248	3,224	3,227	3,182
5	15,238	12,003	3,623	3,806	3,465	4,068	3,966

---

6	13,911	11,737	4,665	4,605	3,944	4,955	4,787
7	14,687	12,355	4,519	4,915	4,222	5,384	5,177

---

Para o modelo computacional utilizado, os valores encontrados são satisfatórios para as camadas mais profundas do perfil do solo analisado, corroborando com Willmott (1981) que sugeriu a utilização do EQM para comparação de um modelo computacional com dados coletados. Valores de EQM acima de seis acarretam em taxas percentuais de erro maiores que 15%, o que já não é considerado aceitável, como pode ser visto nas duas primeiras camadas do perfil estudado.

Cichota et al. (2004) utilizaram o EQM para comparar dois modelos distintos, sendo um deles o método das diferenças finitas e o outro um modelo analítico. Tais autores encontraram que os erros gerados a partir do método das diferenças finitas são menores que os erros gerados pelo modelo analítico.

Neto et al. (2015) objetivaram realizar a caracterização térmica de dois tipos de solos do Agreste Meridional do Estado de Pernambuco, através dos métodos harmônico e logarítmico, a fim de facilitar o entendimento das relações solo-planta-atmosfera e concluíram que os valores da difusividade térmica, fornecidos pelos diferentes métodos adotados, encontraram-se dentro da faixa estabelecida na literatura, mostrando a eficiência desses métodos.

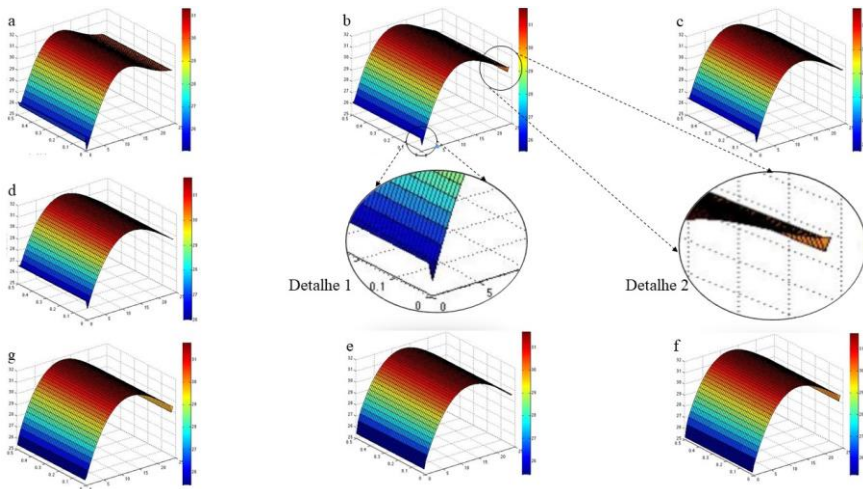
Silans et al. (2006) utilizaram o EQM para comparar os dados do modelo com os dados coletados no campo, mostrando que os métodos de Corrected Laplace Transform Method (CLTM) e Nassar e Horton's (NHS) podem ser utilizados para calcular características térmicas do solo, como a difusividade térmica, fornecendo respostas satisfatórias para as camadas superficiais, no caso do método CLTM, e para todas as camadas, no caso do NHS, para o solo do domínio caatinga do Semiárido paraibano.

Além disso, com o método das diferenças finitas observou-se que as temperaturas do solo do agreste meridional de Pernambuco apresentam uma uniformidade diária, o que pode ser constatado nas curvas de temperatura versus profundidades diárias e semanais presentes nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Contudo, é possível perceber que as camadas mais próximas da superfície sofrem variações abruptas na primeira hora de sol, Figura 2 - detalhe 1, elevando suas temperaturas em quase 1,0 °C em aproximadamente 30 minutos, diferentemente das camadas mais profundas que tem uma resposta retardada quando comparada com as demais, Figura 2 - detalhe 2.

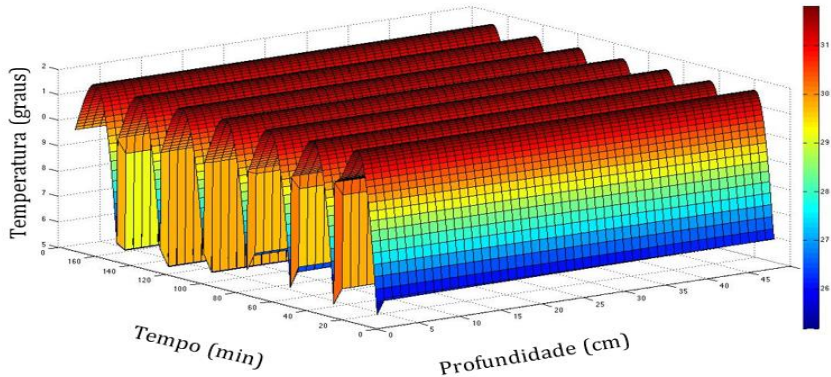
Nota-se que nas horas mais quentes do dia a temperatura do solo ultrapassou a marca dos 31 °C, atingindo uma máxima de 31,5 °C no primeiro dia de janeiro de 2011. Além disso, pode-se perceber que ao final de alguns dias a temperatura das camadas mais superficiais do solo

*Modelagem da Transferência de Calor... Holanda & Soares*  
volta a apresentar ligeiro aumento devido à perda de calor das camadas inferiores (Figura 2).

**Figura 2 (a, b, c, d, e, f, g, detalhe 1 e detalhe 2).** Gráfico da temperatura versus profundidade de um solo do agreste meridional pernambucano do primeiro ao sétimo dia de janeiro de 2011 e detalhes.



**Figura 3.** Gráfico da temperatura versus profundidade de um solo do agreste meridional pernambucano durante a primeira semana de janeiro de 2011.



Analisando apenas os dados que deram origem à Figura 2, não fica tão evidente a presença da continuidade ou da semelhança no valor das temperaturas obtidas pelo método das diferenças finitas. Assim, condensando-se os sete dias consecutivos de resultados obtidos utilizando-se esse modelo, referentes à primeira semana do mês de janeiro de 2011, pode-se visualizar a uniformidade desejada, pois não há descontinuidades visíveis na mudança de um dia para o outro (Figura 3), em que se pode perceber a uniformidade na curva de temperatura, comprovando a eficácia do método escolhido.

Também se constatou que há boa penetração da onda de calor nas camadas estudadas, 2,0; 8,0; 10,0; 20,0; 30,0; 40,0 e 50,0 cm, pois a distribuição de calor foi praticamente homogênea em todos os níveis de profundidade. Com base nesta observação e na análise da variação de temperatura durante todo o período de estudo, o solo em questão pode ser caracterizado como um solo de baixa difusividade térmica,

*Modelagem da Transferência de Calor... Holanda & Soares* corroborando com Neto et al. (2015), porém, estudos mais detalhados das camadas subjacentes poderão confirmar esta caracterização.

Silans et al. (2006) também demonstraram que a difusividade térmica do solo está relacionada com sua capacidade de absorver calor e transferi-lo para as camadas mais profundas. Este fenômeno pode ser observado em solos com temperaturas elevadas na superfície e baixas em camadas subjacentes, para solos com baixa difusividade. Entretanto, esta característica está diretamente relacionada à composição granulométrica, à constituição e à densidade deste solo, por exemplo, (ELIAS, 2004; RAO et al., 2005).

#### **4. Conclusões**

A utilização do modelo criado a partir da discretização implícita do método das diferenças finitas, aplicado à equação da transferência de calor, rendeu resultados satisfatórios para o fluxo de calor no solo do Agreste Meridional pernambucano, tendo em vista que os valores encontrados através da solução numérica/computacional são muito semelhantes aos valores aferidos *in loco*.

O solo avaliado pode ser caracterizado como um solo de baixa difusividade térmica, porém estudos mais detalhados das camadas subjacentes poderão confirmar esta caracterização.

O uso do modelo criado a partir da discretização implícita do método das diferenças finitas facilita a realização de estudos futuros para estimar o fluxo de calor em profundidades maiores, sem o auxílio da coleta de dados em camadas mais profundas do solo.

## 5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa e da bolsa concedidos à Universidade de Pernambuco (UPE).

## 6. Referências

ALMEIDA, A. V. D. L.; CORRÊA, M. M. ; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; SANTORO, K. R.; ANTONINO, A. C. D. **Atributos físicos, macro e micromorfológicos de neossolos regolíticos no agreste meridional de pernambuco**. Revista brasileira de ciência do solo (online), v. 39, p. 1235-1246, 2015.

BELTRÃO, B. A.; MASCARENHAS, J. C.; MIRANDA, J. L. F.; JUNIOR, L. C. S.; GALVÃO, M. J. T. G.; PEREIRA, S. N (2005). Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Estado de Pernambuco. **Diagnóstico do Município de São João. Ministério de Minas e Energia (MME)**. Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM). 19 p.



*Modelagem da Transferência de Calor... Holanda & Soares*  
BITTELLI, M.; VENTURA, F.; CAMPBELL, G. S.; SNYDER, R. L.;  
GALLEGATI, F.; PISA, P. R. Coupling of heat, water vapor, & liquid  
water fluxes to compute evaporation in bare soils. **Journal of  
Hydrology**, v. 362, p. 191-205, 2008.

CARVALHO, S. P. de; SOUZA, J. R. S. de; MAKINO, M.  
Observações e estimativas de propriedades térmicas do solo sob floresta  
e pastagem no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**,  
v. 28, p. 331-340, 2013.

CICHOTA, R.; ELIAS, E. A.; DE JONG VAN LIER, Q. Finite-  
difference model for soil heat transfer: test of validity by comparing  
numerical and analytical solutions. **Environmental Modeling &  
Software**, v. 19, p. 495-506, 2004.

ELIAS, E. A. **Modelagem analítica do perfil de temperatura no solo**.  
2004. 67p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de  
Agricultura Luiz de Queiroz-SP, 2004.

FERREIRA, V. G.; LIMA, G. A. B. **Solução numérica de equações  
diferenciais parciais**. Universidade Federal da Paraíba, 2010.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego  
Elsevier/Acad. Press, 2004. 494 p.

NETO, J. de A. M. **Caracterização térmica dos solos**. Recife,  
2011. xv, 55 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de  
Pernambuco. CTG. Programa de Pós Graduação em Tecnologias  
Energéticas e Nucleares, 2011.

NETO, J. A. M.; ANTONINO, A. C. D. ; LIMA, J. R. S. ; SOUZA, E. S. ;  
SOARES, W. A. ; ALVES, E. M. ; ALMEIDA, C. A. B. ; NETO, J. A. S.  
Caracterização Térmica de Solos no Agreste Meridional do Estado  
de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.  
08, p. 167-178, 2015.

NOWAMOOZ, H.; NIKOOSOKHAN, S.; LIN, J.; CHAZALLON, C. Finite difference modeling of heat distribution in multilayer soils with time-spatial hydrothermal properties. **Renewable Energy**, v 76, p. 7-15, 2015.

POULOVASSILIS, A., KERKIDES, P., ALEXANDRIS, S., RIZOS, S. A contribution to the study of the water and energy balances of an irrigated soil profile A. Heat flux estimates. **Soil and Tillage Research** v.45, p.189-198, 1998.

RAO, T. V. R.; SILVA, B. B.; MOREIRA, A. A. Características térmicas do solo em Salvador, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 09, n. 04, p. 554-559, 2005.

SANTOS, M. A. F. **Estimativa da transferência de calor e da difusividade térmica do solo, baseado na solução da derivada temporal fracionária de meia ordem em ferramenta de software**. 2014. 85p. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte-RN, 2014.

SILANS, A. M. B. P; SILVA, F. M. da; WERLANG, L. M.; BARBOSA, F. A. R. Determinação in loco da difusividade térmica num solo da região de Caatinga - PB. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 41-48, 2006.

SOARES, W. A.; ANTONIO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; LIRA, OLIVEIRA C. A. B. de. Comparação de Seis Algoritmos para a Determinação da Difusividade Térmica de um Latossolo Amarelo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 07, p. 146-154, 2014.

WILLMOTT, C. J. On the validations of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.