

MODELAGEM DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO SOLO EM MÚLTIPLAS PROFUNDIDADES UTILIZANDO A LINGUAGEM R

WAGNER DE ALMEIDA LUCAS¹; JEFERSON MEIRA²; MANOEL JORDAN CAMPOS SANTOS³; CAIO PEREIRA FERNANDES⁴; LESLIE DARIEN PÉREZ FERNÁNDEZ⁵; RUTH DA SILVA BRUM⁶

¹Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – wagneralmeidalucas94@hotmail.com

²Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – meiraengagricola@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – manojordan107@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – caiofernandes5086@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – leslie.fernandez@ufpel.edu.br

⁶Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – ruth.silva.brum@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A temperatura do solo é uma variável fundamental que influencia diretamente uma ampla gama de processos ambientais, ecológicos e de engenharia. As variações térmicas na superfície, impulsionadas principalmente pela radiação solar, propagam-se para o interior do solo de forma não imediata e complexa (ROMIO et al., 2022). Essa propagação ocorre na forma de ondas térmicas senoidais, cuja amplitude diminui progressivamente e cuja fase se desloca no tempo à medida que a profundidade aumenta. Esse comportamento dinâmico é governado pelas propriedades físicas do solo, como a condutividade térmica, a umidade, a densidade e a composição mineralógica (ZHANG et al., 2023).

A compreensão dessa dinâmica térmica é crucial para o desenvolvimento de soluções em diversas áreas da engenharia. A modelagem da variação da temperatura do solo é essencial, como no dimensionamento e otimização de sistemas geotérmicos, que utilizam o solo como fonte ou sumidouro de calor para, por exemplo, climatização de edifícios. O estudo desse fenômeno também encontra aplicações diretas em geotecnia, energia renovável e monitoramento ambiental, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos recursos (NÓBREGA et al, 2020).

Este trabalho tem por objetivo modelar a variação da temperatura do solo em múltiplas profundidades utilizando a linguagem R através da interface Rstudio. A pesquisa se baseou na implementação computacional da solução analítica da equação da difusão de calor para simular o comportamento térmico do solo. O estudo busca demonstrar a atenuação da amplitude térmica e a defasagem temporal à medida que a profundidade aumenta, o que é crucial para aplicações de engenharia como no dimensionamento de sistemas geotérmicos.

2. METODOLOGIA

Neste estudo, a metodologia consistiu na implementação computacional de uma solução analítica para a equação da difusão de calor. Esta solução descreve a propagação de uma onda térmica em um meio semi-infinito, com variação senoidal na sua superfície. A equação utilizada, que modela a temperatura T do solo em função da profundidade z e do tempo t , é apresentada por Brum (2013) e pode ser expressa da seguinte forma:

$$T(z, t) = T_0 + \theta_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z\right) \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z\right)$$

Onde:

T_0 : Temperatura Anual do Solo.

θ_0 : Amplitude da variação diária de temperatura.

ω : Frequência angular da variação de temperatura.

α : Difusividade térmica do solo.

Para a simulação, foram utilizados os seguintes valores dos parâmetros no modelo: a temperatura média anual do solo, $T_0=25^\circ\text{C}$; a amplitude da variação diária de temperatura, $\theta_0=6.3^\circ\text{C}$; a frequência angular $\omega=0.017214$ radianos/dia, representando o ciclo anual; e a difusividade térmica do solo $\alpha=0.057$ m^2/dia . O modelo foi aplicado para calcular a temperatura em profundidades de 0.50, 1.00, 1.50 e 2.00 metros, utilizando como dado de entrada a série temporal da temperatura do ar externo de dois anos.

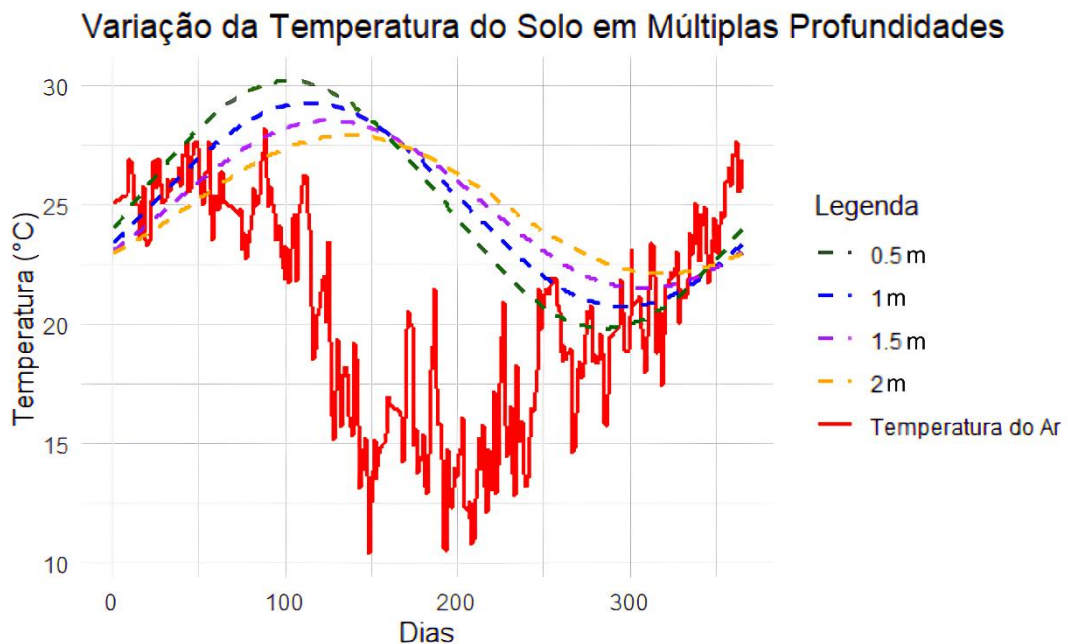
Para a implementação e execução dos cálculos, foi utilizado o software RStudio em conjunto com a linguagem de programação R. O ambiente RStudio foi selecionado por sua capacidade de lidar com a modelagem de forma eficiente, permitindo a utilização de pacotes como o dplyr para a manipulação e organização dos dados e o ggplot2 para a visualização gráfica dos resultados. O processo envolveu a leitura da série de dados de temperatura, o ajuste dos parâmetros do modelo e a aplicação da equação para calcular a temperatura do solo em cada uma das profundidades especificadas.

Os resultados da simulação, abrangendo um período de dois anos, foram filtrados para análise do segundo ano, a fim de garantir que os efeitos iniciais da simulação não interferissem na interpretação do comportamento de regime permanente do modelo. Os dados simulados, incluindo a temperatura do ar e as temperaturas do solo em múltiplas profundidades, foram então exportados para um arquivo Excel. Adicionalmente, foi gerado um gráfico utilizando a biblioteca ggplot2, que demonstra a variação da temperatura do solo em relação à temperatura do ar ao longo do tempo, destacando a atenuação da amplitude e a defasagem temporal em cada profundidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação da variação da temperatura do solo, implementada na linguagem R, demonstrou de forma eficaz os principais fenômenos da transferência de calor por condução. Os resultados obtidos confirmaram a atenuação da amplitude térmica e a defasagem temporal à medida que a profundidade aumenta. Conforme a Figura 1, a variação de temperatura é significativamente reduzida nas camadas mais profundas, o que evidencia a estabilidade térmica do solo em profundidade. Este comportamento é crucial para aplicações de engenharia, como no dimensionamento de sistemas geotérmicos, onde a baixa variabilidade da temperatura do solo é fundamental.

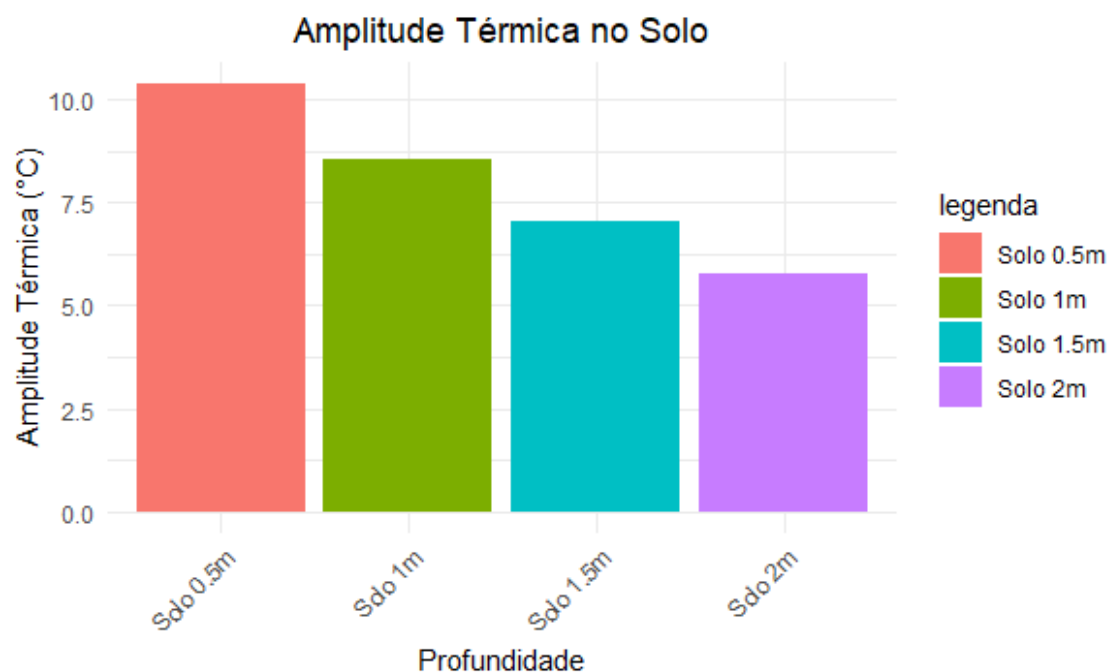
Figura 1. Gráfico da variação da temperatura em diferentes profundidades.



Fonte: Autores, 2025.

Para analisar a amplitude térmica do solo, foi gerado um gráfico para analisar a atenuação da variação de temperatura em função da profundidade (Figura 2). O resultado demonstra de forma quantitativa que a amplitude de oscilação térmica decresce à medida que se avança para as camadas mais profundas do solo, o que valida o fenômeno físico de que o solo atua como um isolante térmico. Esta análise é de extrema importância prática, pois reforça o princípio de que, a partir de uma certa profundidade a temperatura do solo atinge uma notável estabilidade.

Figura 2. Amplitude térmica em diferentes profundidades.



Fonte: Os autores, 2025.

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a viabilidade e a eficácia da modelagem da variação da temperatura do solo em múltiplas profundidades utilizando a linguagem R. A implementação computacional da solução analítica da equação da difusão do calor permitiu simular o comportamento térmico do solo com precisão, confirmando os princípios físicos de atenuação de amplitude e defasagem temporal. Os resultados obtidos evidenciaram de forma quantitativa que a amplitude da oscilação de temperatura decresce exponencialmente com o aumento da profundidade. Essa atenuação progressiva leva a uma importante conclusão prática: a partir de uma determinada profundidade, a variação de temperatura se torna insignificante, conferindo ao solo uma notável estabilidade térmica. Tal estabilidade é de fundamental importância para a engenharia, pois valida o uso do solo como um reservatório térmico confiável e previsível.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUM, R. S. *Modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar*. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Instituto de Matemática, Estatística e Física, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2013.

NÓBREGA, E. de S. B.; BRUM, R. da S.; RAMALHO, J. V. de A.; QUADROS, R. S. de. A first study on earth-air heat exchanger in Pelotas. *Revista Mundi – Engenharia, Tecnologia e Gestão*, Paranaguá, v. 5, n. 6, p. 286-01–286-15, 2020.

ROMIO, L. C.; ZIMMER, T.; BREMM, T.; BULIGON, L.; HERDIES, D. L.; ROBERTI, D. R. Influence of different methods to estimate the soil thermal properties from experimental dataset. *Land*, Basel, v. 11, n. 11, p. 1960, 2022.

ZHANG, H.; DU, H.; SUN, S.; WANG, Y.; WANG, T.; LI, L. A symmetrical exponential model of soil temperature in temperate steppe regions of China. *Open Geosciences*, Basel, v. 15, n. 1, p. 20220523, 2023.