



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Propriedades térmicas do solo: estudo de caso em uma região do semiárido alagoano no nordeste brasileiro

Péricles Vale Alves¹, Vandoir Bourscheidt², Carlos Alexandre Santos Querino³, Marcos Antônio Lima Moura⁴

¹Doutorando em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos, docente no Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, CEP. 69800 000, Amazonas, periclesmat@ufam.edu.br (autor correspondente); ²Doutor em Geofísica Espacial, docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, CEP. 135565 905, São Paulo, vandoir@ufscar.br; ³Doutor em Física Ambiental, docente no Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, CEP. 69800 000, Amazonas, carlosquerino@ufam.edu.br; ⁴Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Av. Lourival Melo Mota, S/Nº. Tabuleiro do Martins, CEP 57072-900, Maceió-AL, Brasil, malm@ccea.ufal.br.

Artigo recebido em 09/10/2023 e aceito em 06/06/2024

RESUMO

Em um contexto de mudanças climáticas globais, o monitoramento da temperatura do solo é de grande relevância para o entendimento das trocas energéticas do solo com a atmosfera e, portanto, para o balanço energético. O objetivo deste trabalho foi determinar algumas propriedades térmicas do solo utilizando dados de temperatura do solo e, de maneira indireta, investigar o impacto da precipitação sobre essas propriedades. Esse estudo foi conduzido em uma área de Caatinga (09°42,664' S; 37°25,008' W; 165m) no semiárido alagoano, cujo solo foi classificado como Franco-Argilo-Arenoso. No intuito de calcular a difusividade térmica do solo (K), foram utilizados três métodos distintos: amplitude, fase e logarítmico, além das variáveis profundidade de amortecimento, velocidade de propagação da onda e inércia térmica aparente. Para isso foram medidas temperaturas do solo nas profundidades de 0,01; 0,05; 0,10; 0,20 e 0,50m utilizando termopares do tipo E (cobre-constantan). A K diária se encontra dentro das faixas relatadas na literatura para o nordeste do Brasil. Constatou-se a influência da chuva na K , a qual alcançou máximos no período chuvoso, independentemente do método e da profundidade da camada considerada. Também foram constatados picos de K na época seca durante ocorrências de chuvas significativas. Em média, a difusividade térmica aumentou em 1,38 vezes com o umedecimento do solo.

Palavras-chave: Temperatura do solo; Caatinga; Nordeste do Brasil.

Soil thermal properties: case study in the Alagoas Semi-arid, northeast Brazil

ABSTRACT

In the context of global climate change, monitoring soil temperature is highly relevant for understanding soil-atmosphere energy exchanges and, therefore, the energy balance. The objective of this study was to determine certain thermal properties of the soil using soil temperature data and, indirectly, to investigate the impact of precipitation on these properties. This study was conducted in a Caatinga area (09°42.664' S; 37°25.008' W; 165m) in the semi-arid region of Alagoas, Brazil, where the soil is classified as Sandy Clay Loam. To calculate the soil thermal diffusivity (K), three distinct methods were used: amplitude, phase, and logarithmic, in addition to the variables damping depth, wave propagation speed, and apparent thermal inertia. Soil temperatures were measured at depths of 0.01, 0.05, 0.10, 0.20, and 0.50m using type E thermocouples (copper-constantan). The daily K values fall within the ranges reported in the literature for northeastern Brazil. The influence of rainfall on K was observed, reaching its maximum during the rainy season, regardless of the method and depth of the layer considered. Peaks in K were also observed during the dry season with significant rainfall events. On average, thermal diffusivity increased by 1.38 times with soil moisture.

Keywords: Soil temperature; Caatinga; Northeastern of Brazil.

Introdução

As regiões semiáridas representam as áreas mais suscetíveis aos efeitos do aquecimento global, e é previsto que elas manifestem rapidamente as mudanças climáticas. Essas áreas constituem zonas de transição entre regiões áridas e semiúmidas, caracterizadas por ecossistemas delicados. As projeções climáticas futuras para as regiões semiáridas do Brasil indicam tendências de redução da precipitação, temperaturas mais altas e aumento da aridez. Isso implica em um maior risco de desertificação, com consequente redução da produtividade agrícola e da biodiversidade (Shukla et al., 2019). Moura et al. (2023) destacam que até 2060, 99% das comunidades vegetais da Caatinga devem experimentar um decréscimo no número de espécies. Ademais, preveem que o futuro clima da região tende a se tornar ainda mais quente e seco, o que acarretará dificuldades significativas para a sobrevivência das árvores. É provável que estas sejam progressivamente substituídas por vegetação de menor porte, principalmente gramíneas, devido à sua capacidade de expansão e crescimento.

Apesar de estar localizada em uma região de clima semiárido e de possuir uma vegetação rasteira adaptada à seca, a Caatinga surpreende pela grande diversidade de paisagens e pela riqueza biológica e de espécies que abriga, configurando-se como um bioma brasileiro de notável biodiversidade. A Caatinga brasileira é considerada o núcleo mais rico das Florestas Tropicais Estacionalmente Secas da região Neotropical (Fernandes et al., 2020), também apresentando altos níveis de endemismo e, ainda assim, uma das regiões biogeográficas neotropicais menos estudadas (Fernandes et al., 2022). Este bioma ocupa 10,1% do território nacional, correspondendo a 53,5% da extensão no Nordeste e 47,3% do estado de Alagoas (IBGE, 2019). A singularidade da Caatinga a torna um bioma único no mundo. Contudo, apesar de sua expressiva riqueza, é lamentavelmente considerado um dos ecossistemas mais negligenciados do Brasil, com a trágica consequência da perda progressiva de sua área original. Atualmente, 50% dessa área já foi desmatada e 13% encontram-se em processo de desertificação (Antongiovanni et al., 2022). A mesma situação é observada com o semiárido alagoano. Atualmente a região encontra-se inserida em área de risco de desertificação e esta condição pode impactar diretamente os atributos físicos e químicos do solo (Oliveira et al., 2021). O solo, por sua vez, é definido como uma composição de partículas minerais de diversos tamanhos e, devido às características únicas de cada tipo, torna-se

essencial identificar suas propriedades térmicas em cada situação (Danelichen & Biudes, 2011).

Uma das regiões que apresentam características distintas e únicas dos solos é o semiárido nordestino que são rasos e exibem propriedades físicas e químicas não homogêneas. A granulometria, em particular, se destaca, sendo predominantemente composta por solos arenosos (Cirilo et al., 2020). No Nordeste brasileiro, a irregularidade das chuvas é a principal característica da região. Esta é marcada por longos períodos de estiagem que afetam a paisagem, mesmo durante o período chuvoso, devido à variabilidade no regime de precipitação (Lira et al., 2020). Não obstante, as ocorrências de chuvas concentradas podem resultar em processos erosivos, os quais ocasionam um arrastamento significativo de partículas de solo, matéria orgânica e nutrientes para os corpos hídricos, pois os solos são altamente suscetíveis à erosão hídrica devido à ocorrência de fortes chuvas, à presença de vegetação decídua, à extensa exposição do solo e ao uso de técnicas agrícolas não conservadoras (Borges Neto et al., 2023). Nas regiões semiáridas um dos mais graves e importantes problemas ambientais é a quantitativa e qualificativa deterioração dos solos pela erosão hídrica, que impactam de forma direta, em suas propriedades térmicas (Xavier et al., 2023).

Por conseguinte, essas propriedades térmicas desempenham um papel fundamental ao regular a troca de energia entre o solo e a atmosfera e podem ser melhor compreendidas através do estudo da difusividade térmica (K) (Alrtimi et al., 2016).

Os numerosos processos físicos que ocorrem no solo estão diretamente relacionados com a complexo sistema solo-planta-atmosfera. A difusividade térmica (K) exerce influência em diversos processos do solo, como a distribuição de temperatura, armazenamento de água, germinação de sementes, atividades microbianas, o balanço de energia superficial e a capacidade do solo de resistir a possíveis variações climáticas (Adhikari et al., 2014). Se o solo sofre qualquer tipo de intervenção, então os valores de K são influenciados, afetando matéria orgânica do solo, teor de umidade, densidade aparente e formação e estabilidade de agregados (Dai et al., 2022). Embora a K aparente do solo esteja associada a processos transitórios de condução de calor e convecção intraporosa (Zhang & Osterkamp, 1995; Silans et al., 1996), ela é o principal mecanismo de transferência de calor no interior do solo (Jury & Horton, 2012). A baixa difusividade do solo indica menor capacidade de transferência de energia e

maior capacidade de armazenar energia e vice-versa (Chaves et al., 2022). A determinação de K aparente pode ser realizada por meio de métodos que envolvem medição da variação de temperatura em diversas profundidades do solo em condições de campo (Horton et al., 1983). Esses métodos são vantajosos por exigirem apenas medições de temperatura, mas é crucial salientar que são aplicáveis em camadas de solo homogêneas e este tipo de informação, não são tão acessíveis.

Um dos grandes problemas atuais para estudos da K do solo é a escassez, ou até mesmo inexistência de medidas *in loco* de vários parâmetros específicos do solo tais como perfil de temperatura, umidade, fluxo de calor entre outros. Estas informações são essenciais, uma vez que os modelos empíricos utilizados na estimativa de K , requerem como entrada, esse tipo de dados, o que acaba limitando sua aplicação. Além disso, o cálculo das propriedades térmicas a partir apenas dos dados de textura e densidade do solo pode ser propenso a erros devido à complexa interação entre o tamanho, a forma e compactação das partículas em seu interior (Evelt et al., 2012).

A disponibilidade de radiação solar na superfície do solo e dos processos relacionados a transferência de calor no solo determinam a temperatura do solo. Observações frequentes em

diferentes profundidades permitem a identificação de seu comportamento térmico e a compreensão de suas propriedades importantes. Mengistu et al. (2017) demonstraram que a influência da temperatura sobre as propriedades térmicas do solo é pouco significativa em condições de teores de água extremamente baixos e/ou altos. Isso ocorre porque a presença de água auxilia na criação de pontes entre as partículas do solo, o que, por sua vez, melhora a qualidade dos contatos entre elas. Esse fenômeno resulta em um aumento de todas as propriedades térmicas.

Com base no que foi exposto, o objetivo deste trabalho foi determinar algumas propriedades térmicas do solo com a hipótese que estas propriedades são impactadas pela precipitação na região do semiárido de Alagoas.

Material e métodos

Área de estudo

O experimento foi conduzido na cidade de Pão de Açúcar, situada no Oeste do estado de Alagoas, e pertencente à mesorregião do sertão alagoano (Figura 1), mais especificamente, nas dependências da Fazenda Mourão (09°42,664' S; 37°25,008' W; 165m).

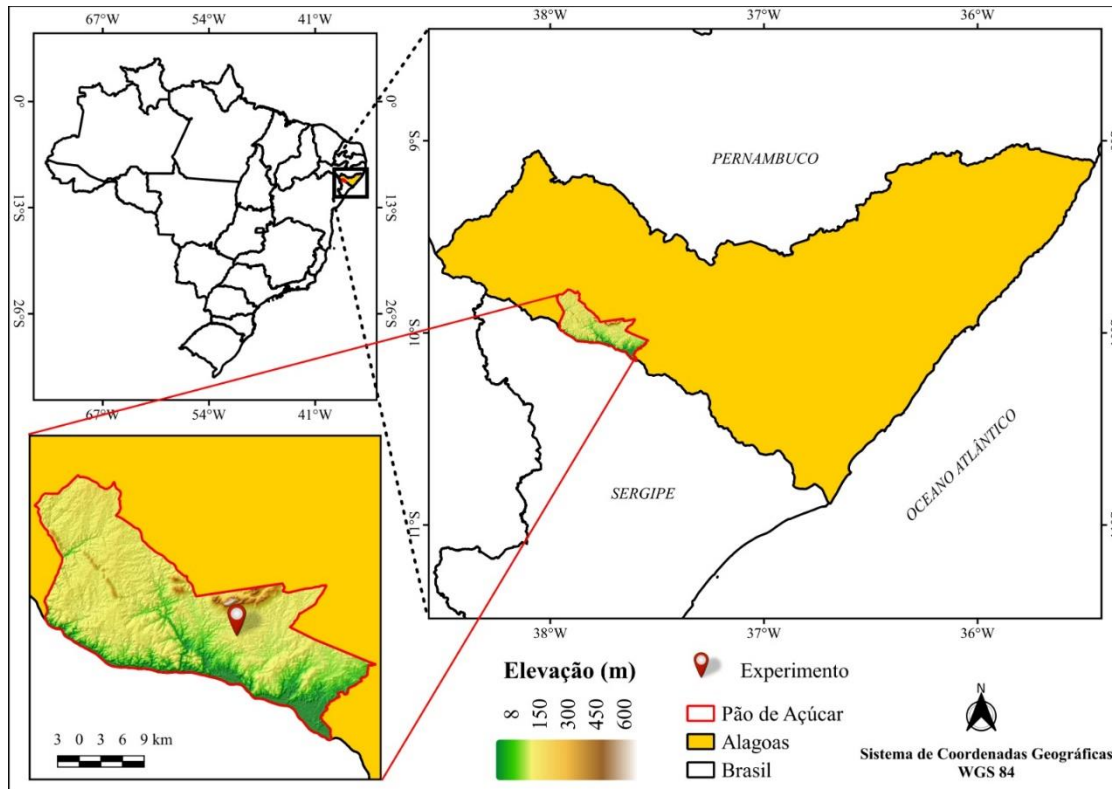


Figura 1. Localização geográfica do Estado de Alagoas e município de Pão de Açúcar.

O clima do município é classificado como DA's2d, seguindo a classificação de Thornthwaite-Mather. É caracterizado por ser semiárido (D), Megatérmico (A') com uma notável deficiência hídrica no verão (s2) e excesso de água no inverno (d). A precipitação média anual é de 571,87mm, concentrando-se principalmente entre maio e julho, meses do período chuvoso na região. Fevereiro e agosto são, respectivamente, os meses mais quente e mais frio em Pão de Açúcar, cujas médias são de 24,58°C e 20,21°C. A temperatura média anual é de 27,6°C (Santos et al., 2013).

Características do Solo

A textura do solo é uma das características físicas mais consistentes e representa a partição quantitativa das partículas do solo em termos de tamanho. Contudo, a ênfase na avaliação da textura está principalmente relacionada à quantificação e à qualidade do solo. As frações texturais do solo consistem em três: areia, silte e argila, cada uma com dimensões variáveis. O solo na região de estudo é classificado como Franco Argilo Arenoso, e demonstra uma notável homogeneidade em sua textura ao longo das diferentes profundidades, com apenas pequenas variações na composição observadas nos níveis de medição (Tabela 1)

Tabela 1. Análise física e classificação do solo quanto a sua textura em várias camadas em uma área de Caatinga no semiárido alagoano.

Parâmetros	Camadas				Média
	0 – 0,05m	0,05-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,50m	
Areia grossa	600	560	510	472	535
Areia Fina	120	110	130	206	142
Silte	180	210	220	135	186
Argila	100	120	140	187	137
Classificação	Franco Argilo Arenoso				

Coleta e tratamento dos dados

O monitoramento micrometeorológico contou com a instalação de uma torre de 6,5 metros de altura, a qual estava equipada com um saldo radiômetro (CNR 1, Kipp & Zonen), que consistia em 2 piranômetros (CM3) e 2 pirgeômetros (CG3), responsáveis por realizar o balanço de radiação de ondas curta (BOC) e longa (BOL) no período de abril/2019 a janeiro/2020. Além disso, a torre possuía medidas de perfil de temperatura do solo (T_s) localizados nas profundidades de 0,01; 0,05; 0,10; 0,20 e 0,5m, medidos por meio de termopares do tipo E, fabricados com cobre-constantan (Campbell Scientific Inc.). Neste caso específico, foi montada uma bateria de sensores composta por tubos e conectores de Policloreto de Vinila (PVC). Durante o processo de perfuração, uma broca helicoidal com diâmetro de 0,0315m foi utilizada para minimizar qualquer perturbação no solo, assegurando um ajuste preciso para a bateria de PVC, incluindo os sensores de temperatura. Foi considerado que os sensores de temperatura estabeleciam contato direto com o material do solo.

Todos os sensores foram conectados a dois dataloggers (CR10X, Campbell Scientific Inc.),

programados para realizar medições a cada 30 segundos e registrar médias a cada 10 minutos. Esses dados foram armazenados em módulos de armazenamento específicos. Os dados de precipitação para o mesmo período de estudo foram coletados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia da cidade de Pão de Açúcar - AL (-9,749167; -37,43083, 20m), localizada a aproximadamente 4,5km do sítio experimental. Após a coleta dos dados, eles foram analisados e processados para calcular as médias horárias e diárias. Em seguida, foram plotados gráficos utilizando linguagem Python versão 3.11, estabelecendo as relações adequadas entre os diferentes parâmetros.

Propriedades térmicas avaliadas

Foram estimadas através de modelos, três propriedades térmicas do solo: método da amplitude, método logarítmico e método de fase. Ressalta-se que todos estes métodos determinam a difusividade térmica (K) através dos dados de temperatura do solo (T_s) conforme demonstrado a seguir.

Difusividade térmica (K)

A difusividade térmica do solo (K ; $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) é a razão de sua condutividade e sua capacidade térmica volumétrica. É um parâmetro importante que descreve a capacidade de um material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazenar energia (Boukelia et al., 2019). O cálculo de K foi realizada entre as profundidades de 0,01 a 0,05m, 0,01 a 0,10m e 0,01 a 0,50m. Para diferentes intervalos de tempo foram utilizados métodos apropriados para cada um deles. Infelizmente o sensor de T_s posto em 0,20m só funcionou um mês, de modo que o mesmo foi descartado. Os detalhes das informações e considerações acerca dos métodos empregados para calcular a difusividade térmica do solo podem ser encontrados em Gao et al. (2009).

Método da amplitude (K_a)

O método da amplitude (Equação 1) foi empregado para determinar o ciclo anual da difusividade térmica do solo (K_a) e, para tal, foram utilizadas as medidas em todas as camadas do solo.

$$K_a = \left(\frac{w}{2}\right) \left[\frac{(z_2 - z_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \right]^2 \quad (1)$$

em que ΔT_1 e ΔT_2 são as amplitudes térmicas entre profundidades z_1 e z_2 , respectivamente, obtidas a partir das temperaturas de cada uma das profundidades, enquanto w é a velocidade angular do planeta, que é igual a $7,27 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$.

Método do logarítmico (K_l)

Pelo método logarítmico a estimativa da difusividade térmica do solo (K_l) foi obtida considerando as médias horárias, intervaladas a cada 6h, da temperatura do solo nas profundidades z_1 e z_2 , onde T_1 e T'_1 (0 hora), T_2 e T'_2 (6 horas), T_3 e T'_3 (12 horas) e T_4 e T'_4 (18 horas) (Equação 2).

$$K_l = \left[\frac{0,121 * (z_2 - z_1)}{\ln\left(\frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T'_1 - T'_3)^2 + (T'_2 - T'_4)^2}\right)} \right]^2 \quad (2)$$

Método da fase (K_f)

A difusividade térmica do solo obtida pelo método da fase (K_f) foi utilizada para determinar os períodos em que a onda de temperatura passou por um máximo na profundidade z_1 e na profundidade z_2 (Equação 3):

$$K_f = \left(\frac{1}{2w}\right) \frac{(z_2 - z_1)^2}{\Delta t} \quad (3)$$

em que z_1 e z_2 são as profundidades do solo e Δt é a variação de tempo obtido pela diferença de intervalo entre t_2 e t_1 .

Profundidade de amortecimento (D)

A partir dos resultados obtidos, foi calculada a profundidade de amortecimento, também conhecida como “*damping*” (D). Conforme Ramana Rao et al. (2005), essa profundidade corresponde ao ponto em que a amplitude da onda da temperatura diminui para 1/e do seu valor na superfície. Na Equação (4), e representa a constante de Euler, aproximadamente igual a 2,7183.

$$D = \sqrt{\frac{2K}{w}} \quad (4)$$

Velocidade da propagação da onda (V)

A velocidade da propagação da onda da temperatura, foi calculada através da Equação (5):

$$v = \sqrt{2wK} \quad (5)$$

Inércia Térmica Aparente (ITA)

A inércia térmica aparente, foi determinada através do método proposto por Moran et al. (2009) (Equação 6):

$$ITA = \frac{(1 - \alpha)}{\Delta T} \quad (6)$$

onde α é o albedo e ΔT é a amplitude térmica.

Resultados e discussão

Precipitação e radiação solar global

As propriedades térmicas do solo variam devido ao impacto significativo das chuvas na incidência da radiação solar na superfície do solo (Carneiro et al., 2014). Além disso, observa-se que o aumento da umidade do solo está diretamente

relacionado a um aumento na difusividade térmica (Arkhangel'skaya, 2009), pois a água é um eficiente condutor de calor. Durante os 9 meses de observação (283 dias), apenas em dois meses os acumulados mensais de precipitação excederam a normal climatológica (julho e dezembro) (Figura 2).

No total, choveu 302,8mm, dos quais 216,6mm ocorreram durante o período chuvoso (normal climatológica = 317,6mm). Notavelmente, as precipitações de maior volume só iniciaram no final de maio (Figura 2). Do total de dias do experimento, foram observados somente 82 dias (29%) com chuva, dos quais 23,3% (66 dias) de chuvas <5mm, 2,8% (6 dias) de chuvas entre 5 e 10 mm e 2,1% (6 dias) com chuvas >10mm (Figura 2). A precipitação pluviométrica em Alagoas está relacionada às condições atmosféricas e sistemas sinóticos no norte e leste do Nordeste do Brasil (NEB). O período chuvoso no semiárido alagoano

compreende maio a julho, enquanto o seco se estende de outubro a janeiro (Querino et al., 2022).

Na Figura 2 a radiação solar global (R_g) apresentou uma variação diária e sazonal devido a diversos fatores astronômicos e ambientais. A R_g média horária foi de $451,5 \text{ W m}^{-2}$ enquanto a média sazonal foi de $407,5 \text{ W m}^{-2}$ e $511,2 \text{ W m}^{-2}$ no período chuvoso e seco, respectivamente. Os valores elevados da R_g no período seco são comparáveis aos encontrados numa área de Caatinga no interior pernambucano por Lima et al. (2017). Diniz et al. (2013) afirmaram que variações diurnas e sazonais na incidência de radiação solar resultam em constantes alterações nas condições térmicas do solo. Após incidir na superfície do solo, a energia solar é absorvida/transmitida pelo perfil do solo ou refletida de volta para atmosfera, tudo isso em função das propriedades térmicas do solo (Mengistu et al., 2017).

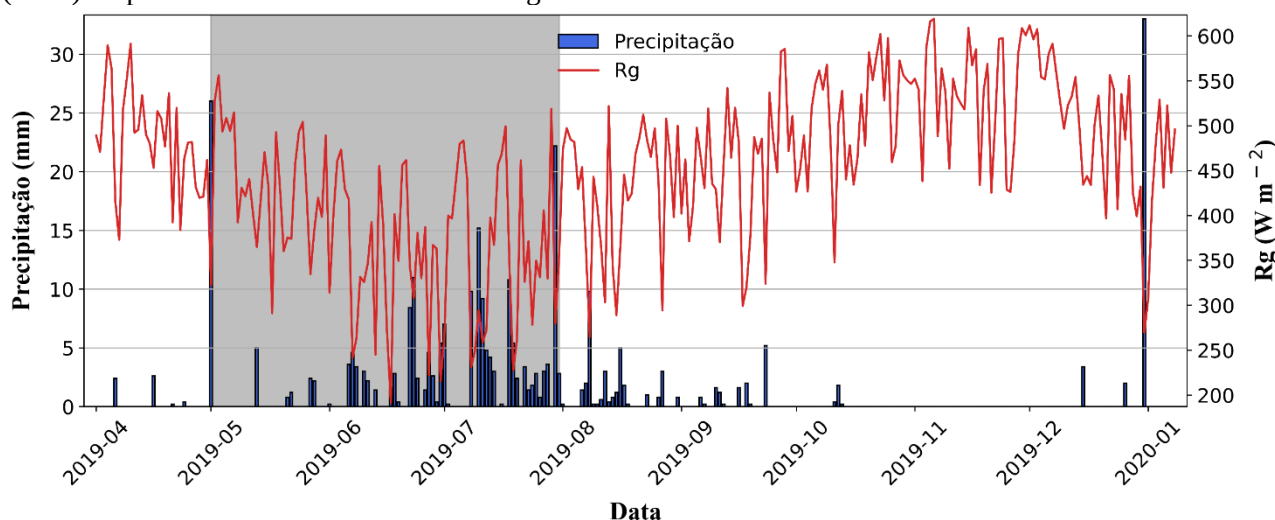


Figura 2. Totais diários da precipitação, em mm, e comportamento médio diário da Radiação solar global (R_g), em W m^{-2} , em uma área de Caatinga durante o período experimental. Área sombreada corresponde à estação chuvosa local.

Propriedades térmicas

Nota-se que, para todos os métodos empregados, os valores de difusividade térmica do solo aumentam de forma gradual à medida que se consideram espessuras maiores do solo (Erro! Fonte de referência não encontrada.). Isso pode ser explicado pelo fato de que a umidade do solo aumenta com a profundidade, resultando, portanto, em um aumento de K (Silva-Aguilar et al., 2018). Esses resultados indicam que K varia consideravelmente ao longo do perfil do solo, o qual é constituído de partículas arranjadas de forma característica, bem como por poros que contém tanto água quanto ar. Embora essa tendência sugira uma correlação com o teor de água nessa faixa

específica do solo, é importante ressaltar que essa afirmação não pode ser confirmada devido à ausência de sensores neste experimento destinados a medir a umidade do solo. Evett et al. (2012) afirmaram que K varia em diferentes profundidades devido não apenas aos diferentes teores de umidade do solo, mas também devido à estrutura e compactação do perfil do solo. Neste caso específico, as estimativas obtidas pelo método de amplitude foram significativamente maiores, enquanto aquelas provenientes dos métodos logarítmico e de fase foram bastante semelhantes (Tabela 2). No estudo de Silva-Aguilar et al. (2018), o método da amplitude foi adotado como padrão, e eles também levaram em consideração o grau de incerteza nos valores estimados para justificar essa escolha. Em princípio, é

aconselhável obter valores específicos do local quando possível (Spitler et al., 2000), pois circunstâncias climáticas muito diferentes acarretam algumas discordâncias ao final do experimento ou da coleta dos dados. Observa-se que os valores das propriedades térmicas do solo relatados na literatura não são consistentes devido

à magnitude dos valores, então as pequenas diferenças não afetam o método utilizado (Diniz et al., 2013). Por esse motivo e pelo fato de cada tipo de solo possuir propriedades próprias, é necessário identificar as propriedades térmicas para cada situação (Danelichen & Biudes, 2011).

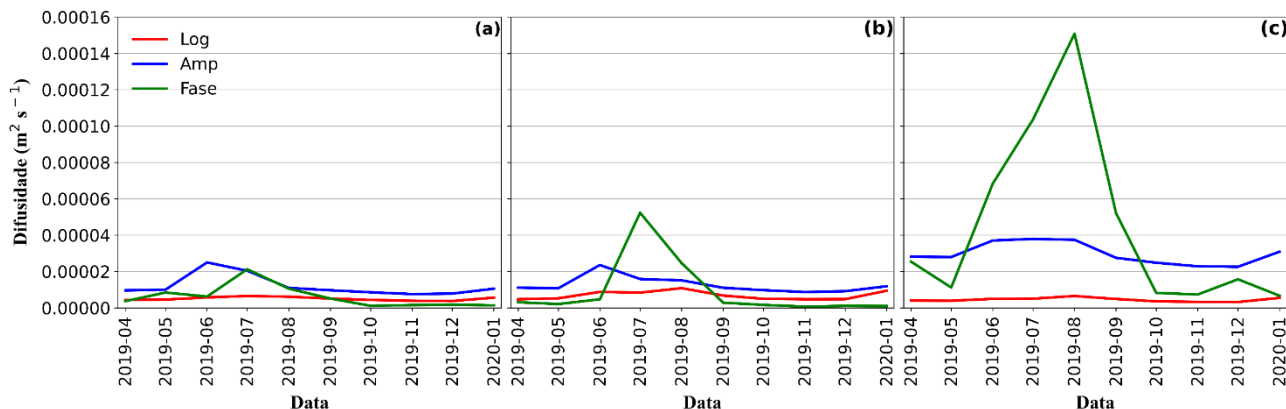


Figura 3. Distribuição das médias mensais da difusividade térmica, em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, estimadas pelos métodos Logarítmico, Amplitude e Fase, nas profundidades 0,01-0,05m (A), 0,01-0,10m (B) e 0,01-0,50m (C).

Tabela 2. Médias das difusividades térmicas do solo durante o período experimental, em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, estimadas pelos métodos Logarítmico, Amplitude e Fase, nas profundidades 0,01-0,05m, 0,01-0,10m e 0,01-0,50m.

Camadas (m)	Métodos		
	Logarítmico ($\times 10^{-6}$)	Amplitude ($\times 10^{-5}$)	Fase ($\times 10^{-6}$)
0,01-0,05	4,99	1,20	6,09
0,01-0,10	6,84	1,26	9,38
0,01-0,50	4,47	2,97	44,9

Independentemente do método utilizado para estimar a difusividade térmica e apesar da falta de medições de umidade do solo, é evidente a influência da água. Na Figura 4, é nítida a distinção de valores entre as épocas seca e chuvosa, com escalas diferentes para destacar o efeito da chuva. Durante o período chuvoso da região, observa-se um aumento notável nos valores da K , independentemente da ordem de grandeza e do método utilizado. Tong et al. (2022) asseguram que para solos arenosos, K aumentou rapidamente com umidade do solo e depois permaneceu estável ou diminuiu ligeiramente, isso vem confirmar o motivo pela qual K aumentou rapidamente com a precipitação. Além disso, é interessante notar que há pouca diferença entre as camadas 0,01–0,05m e 0,01-0,10m.

Conforme relatado anteriormente, o solo da região de estudo é predominantemente arenoso, caracterizado por uma maior porosidade, o que resulta em um menor contato entre as partículas do

solo, dificultando, assim, a difusão de calor. As propriedades estratigráficas do solo nas profundidades experimentais consistem em 67,7% de areia, 18,6% de silte e somente 13,7% de argila. Solos com esta configuração são comuns no semiárido alagoano e tendem a facilitar a infiltração de água, a lixiviação de nutrientes e a redução de perda de solo (Oliveira et al., 2021). Isso, em certa medida, explica os valores baixos da difusividade térmica e como o solo reage quando ocorrem chuvas. Apesar de Dai et al. (2022) e Cavalcanti et al. (2021) confirmaram que a K aumenta conforme crescem os teores de areia. Além disso, durante o período seco, não houve variação acentuada da K . Isso sugere que a R_g não teve uma forte influência, mesmo com um aumento da mesma, já que os valores da K permaneceram praticamente inalterados.

Tessy Chacko & Renuka (2002), na Índia, encontraram também diferenças nas difusividades térmicas de superfícies de solo úmido e seco. Isso decorre basicamente pelo fato de umedecer um solo seco significa substituir o ar no espaço poroso por água. Isso ajudará na formação de pontes de água entre as partículas do solo, aumentando a qualidade dos contatos entre as partículas, e propiciando maior capacidade de condução (é importante enfatizar que a condutividade térmica da água é muito superior à do ar). Em todo caso, as magnitudes das respostas para quantidade de água no solo são variáveis, pois Różański & Stefaniuk (2016) encontraram um aumento linear com o aumento da quantidade de água, enquanto Roxy et

al. (2010) e Dai et al. (2022) afirmaram que o efeito do conteúdo de água no solo na difusividade térmica é limitado e não é linear.

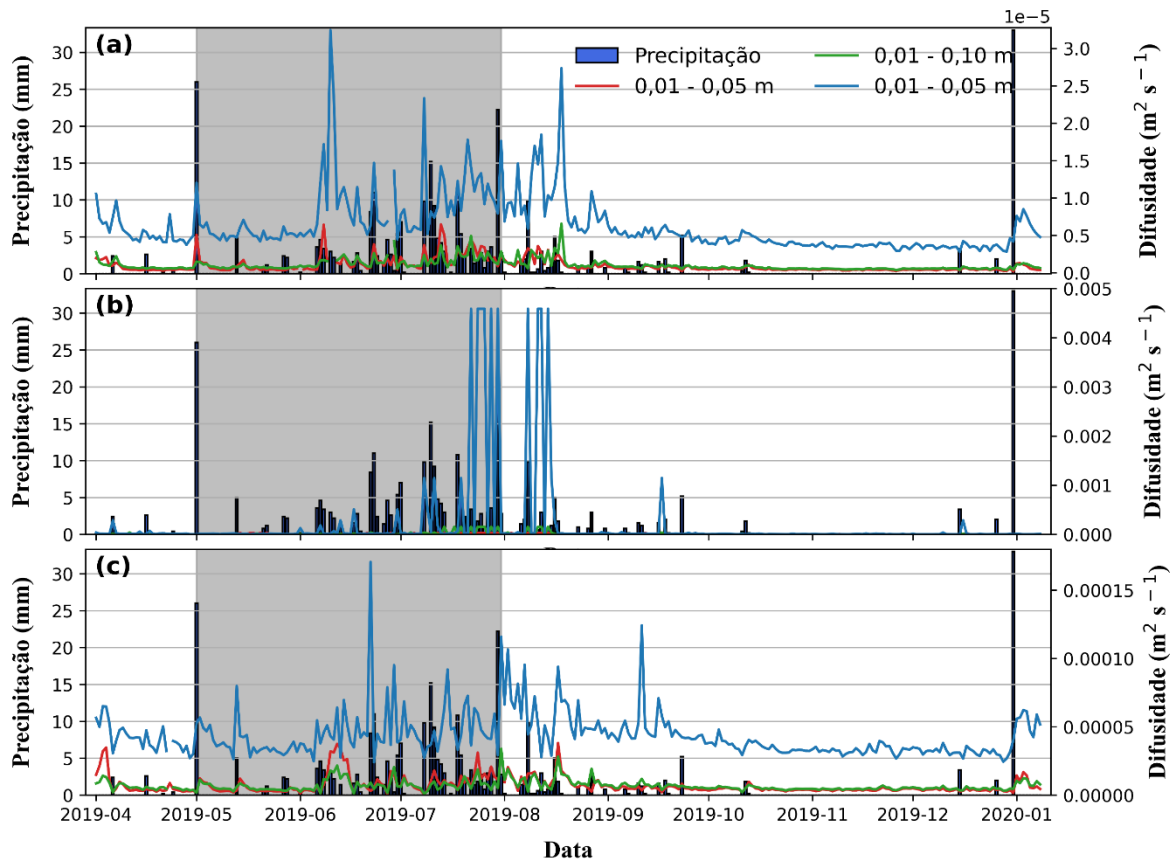


Figura 4. Comportamento diário da difusividade térmica, em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, nas profundidades de 0,01-0,05m, 0,01-0,10m e 0,01-0,50m estimadas pelos métodos Amplitude (a), Fase (b) e Logarítmico (c), juntamente com a distribuição dos totais pluviométricos diários, em mm.

As estimativas diárias da difusividade térmica do solo sob diferentes condições climáticas estão em consonância com as obtidas por outros autores no Nordeste do Brasil. Diniz et al. (2013), em Campina Grande – PB, na profundidade 0,10-0,20m encontraram valores variando entre 0,52 e $0,78 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$. Soares et al. (2014), em Areia – PB, obtiveram média de $0,24 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ entre 0,02-0,08m de profundidade. Diniz et al. (2014), em Lagoa Seca – PB, média de $0,61 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$, entre 0,1-0,2m. Oliveira et al. (2015), em São João – PE, entre 0,02-0,50m com média de $0,52 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$. Farias et al. (2018), em São Gabriel – BA,

encontraram valores que variaram de 0,48 a $0,69 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$.

A floresta Caatinga demonstrou pequena variação de profundidade de amortecimento (D) entre os métodos e camadas adotadas, conforme mostra a Tabela 3. Em termos de médias, foram encontrados valores de 0,49 (1-5cm), 0,49 (1-10cm) e 1,20 (1 – 50 cm). Enquanto velocidade da propagação da onda (V) variou de 0,36 (1-5 cm), 0,64 (1-10cm) a 0,87 (1-50cm). V demonstra a velocidade que o calor penetra no solo, e isso encontra-se em consonância com os resultados observados de difusividade térmica para essa área de estudo.

Tabela 3. Valores da profundidade de amortecimento D (m) e velocidade de propagação V (m s^{-1}) $\times 10^{-6}$ em uma Caatinga no semiárido alagoano durante o período experimental.

Métodos	D			V		
	Camadas					
	0,01-0,05	0,01-0,10	0,01-0,50	0,01-0,05	0,01-0,10	0,01-0,50
Logarítmico	0,52	0,44	1,16	0,38	0,32	0,84
Amplitude	0,58	0,45	0,91	0,42	0,33	0,66
Fase	0,38	0,60	1,55	0,28	0,43	1,13
Média	0,49	0,49	1,20	0,36	0,36	0,87

A inércia térmica aparente (ATI) do solo é a propriedade que controla as variações diurnas e sazonais da temperatura da superfície, ou seja, representa a habilidade do solo para conduzir e armazenar calor. No entanto, ela tem uso muito limitado em áreas com forte evapotranspiração, pois ela pode reduzir a temperatura da superfície através do resfriamento evaporativo (Wang et al., 2010). Para a floresta de Caatinga encontrou-se média de $0,098^{\circ}\text{C}^{-1}$, mas com valores diversos entre as épocas secas e chuvosa. Na época seca foram encontrados os menores valores médios, de $0,055^{\circ}\text{C}^{-1}$, enquanto na chuvosa a média encontrada foi de $0,130^{\circ}\text{C}^{-1}$. Taït-Mesbah et al. (2015) afirmam que a inércia térmica impacta diretamente na temperatura diurna do solo, assim como nos fluxos turbulentos de calor em regiões áridas e semiáridas. Minacapilli et al. (2012) encontraram experimentalmente para três tipos de solos, um único par de valores de ITA para solo seco e saturado, correspondendo aos valores mínimo e máximo observados na série temporal, os quais são iguais a $0,040$ e $0,128^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectivamente.

Conclusões

O desenho experimental e os métodos utilizados permitiram obter simultaneamente múltiplos valores de difusividade aparente do solo (K) em diferentes profundidades num ciclo de medição e geraram incertezas dos valores obtidos, já que várias publicações afirmam que um método de estimativa específico de K é o adequado para uma região, sem a devida pertinente medição.

Apesar de não ter sido realizada a medição da umidade do solo, constatou-se a influência da chuva na K , a qual alcançou máximos na época chuvosa, independentemente do método e da profundidade da camada considerada, como também foram constatados picos de K na época seca durante ocorrências de chuvas significativas.

Os estudos realizados mostraram que a difusividade térmica do solo aumenta em 1,38 vezes sob umedecimento do solo.

Não foi detectada influência da radiação solar global (R_g) na K , pois a R_g aumentou durante o período seco local e a K continuou inalterada, então a variação sazonal de K foi somente dependente da chuva (umidade do solo).

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão ao Senhor Augusto Moura, proprietário da Fazenda Mourão, pelo apoio logístico e pela permissão para a realização da pesquisa. Também agradecem a

todos os que contribuíram durante o trabalho de campo.

Agradecemos o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM através do incentivo à qualificação do primeiro autor por meio do Edital N° 012/2021 - POSGFE e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Adhikari, P.; Udawatta, R.P.; Anderson, S.H. 2014. Soil thermal properties under prairies, conservation buffers, and corn-soybean land use systems. *Soil Science Society of America Journal*, v.78, p.1977–1986. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.02.0074>
- Alrtimi, A.; Rouainia, M.; Haigh, S. 2016. Thermal conductivity of a sandy soil. *Applied Thermal Engineering*, v.106, p.551–560. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.012>
- Antongiovanni, M.; Venticinque, E. M.; Tambosi, L. R.; Matsumoto, M.; Metzger, J. P.; Fonseca, C. R. 2022. Restoration priorities for Caatinga dry forests: Landscape resilience, connectivity and biodiversity value. *Journal of Applied Ecology*, v.59, p.2287–2298. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14131>
- Arkhangel'skaya, T.A. 2009. Parameterization and mathematical modelling of the dependence of soil thermal diffusivity on the water content. *Eurasian Soil Science*, v.42, p.162–172. <https://doi.org/10.1134/S1064229315020027>
- Borges Neto, I. D. O.; Xavier, R. A.; Souza, B. I.; Santos, L. J. C.; Soares, D. A.; Souza, J. J. L. 2023. Preliminary experimental data on surface runoff and soil loss in the Caatinga. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.48, n.9, p. 1-12. <https://doi.org/10.1002/esp.5581>
- Boukelia, A.; Eslami, H.; Rosin-Paumier, S.; Masroui, F. 2019. Effect of temperature and initial state on variation of thermal parameters of fine compacted soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 23, n. 9, p.1125–1138. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1344144>
- Carneiro, R.G.; Moura, M.A.L.; Silva, V.P.R.; Silva Junior, R.S.; Andrade, A.M.D.; Santos, A.B. 2014. Variabilidade da temperatura do solo em função da liteira em fragmento remanescente de mata atlântica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p. 99-

108. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100013>
- Cavalcanti, A.R.; Soares, W.A.; Holanda, M.A.C.R. 2021. Caracterização hidrodinâmica e térmica de um solo de Mata Atlântica. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 5, e54910515398,. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i5.15398>
- Chaves, D.A.; Lyra, G.B.; Francelino, M.R.; Silva, L.D.B.; Schaefer, C.E.R.G.; Thomazini, A. 2022. Apparent thermal diffusivity of soil in ice-free areas of Keller peninsula in maritime Antarctica. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.94 (suppl 1), e20200458. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220200458>
- Cirilo, T.F.; Machado, A.O.V.; Alves, E.S.; Santos, L.W.; Santos, D.P.; Falcão, J.R.S.; Santos, M.A.L. 2020. Diagnóstico do uso do solo na produção agrícola no Alto Canal do Sertão Alagoano. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 52078-52092. <https://DOI:10.34117/bjdv6n7-744>
- Dai, B.; Zhang, Y.; Ding, H.; Xu, Y.; Liu, Z. 2022. Characteristics and Prediction of the Thermal Diffusivity of Sandy Soil. *Energies*, v.15, p.1504-1524. <https://doi.org/10.3390/en15041524>
- Danielichen, V.H.M.; Biudes, M.S. 2011. Avaliação da difusividade térmica de um solo no norte do Pantanal. *Ciência e Natura*, v.33, p.227-240. <https://doi.org/10.5902/2179460X9371>
- Diniz, J. M.T.; Aranha, T.R.B.T.; Sousa, E.P.; Wanderley, J. A.C.; Sousa, E.P.; Maracajá, P.B. 2013. Avaliação da difusividade térmica do solo de Campina Grande-PB-Brasil. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 9, n. 2, p. 55-60.
- Diniz, J. M. T.; Rafael, R. A.; Fideles Filho, J.; Sousa Júnior, J. R.; Fernandes, A. A. 2013. Características térmicas do solo observadas em cidades distintas do estado da Paraíba. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 8, n. 3, p. 117–126. <https://doi.org/10.18378/rvads.v8i3.2274>
- Diniz, J. M. T.; Targino Dantas, R.; Fideles Filho, J.. 2014. Variabilidade espaço-temporal da temperatura e difusividade térmica do solo de Lagoa Seca-PB. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 9,n.4, p. 722-736. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1474>
- Evelt, S. R.; Agam, N.; Kustas, W. P.; Colaizzi, P. D.; Schwartz, R.C. 2012. Soil profile method for soil thermal diffusivity, conductivity and heat flux: Comparison to soil heat flux plates. *Advances in Water Resources*, v.50, p.41–54. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.04.012>
- Farias, P.S.; Souza, L.S.; Paiva, A.Q.; Oliveira, A.S.; Souza, L.D.; Ledo, C.A.S. 2018. Hourly, daily, and monthly soil temperature fluctuations in a drought tolerant crop. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.42, e0170221. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170221>
- Fernandes, M. F.; Cardoso, D.; Pennington, R.T.; Queiroz, L. P. 2022. The Origins and Historical Assembly of the Brazilian Caatinga Seasonally Dry Tropical Forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v.10, 723286. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.723286>
- Fernandes, M. F.; Cardoso, D.; Queiroz, L. P. 2020. An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemism. *Journal of Arid Environments*, v.174, 104079. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104079>
- Gao, Z.; Wang, L.; Horton, R. 2009. Comparison of six algorithms to determine the soil thermal diffusivity at a site in the Loess Plateau of China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 6, p. 2247–2274. <http://dx.doi.org/10.5194/hessd-6-2247-2009>
- Horton, R.; Wierenga, P.J.; Nielsen, D.R. 1983. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Science Society of America Journal*, v.47, p.25-32.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. *Biomass e Sistema Costeiro Marinho do Brasil. Relatório técnico*. Rio de Janeiro: IBGE, p.164.
- Jury, W.A.; Horton, R. 2004. *Soil Physics*. 6th ed. John Wiley & Sons, New York, 384 p.
- Lima, J.R.S.; Oliveira, C.L.; Barbosa, A.C.; Antonino, A.C.D.; Souza, E.S. 2017. Variação sazonal dos fluxos de energia e evapotranspiração em caatinga no agreste pernambucano. *Agrometeoros*, v.25, p.113-120. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26272>
- Lira, E. S.; Santos, D. L. G.; Élida, M. C.; Souza, M. A.; Guimarães Júnior, S. A.M.; Costa, J. G.; Araujo, K. D. 2020. Foliar decomposition of Caatinga species in Alagoas. *RA'EGA*, v.8, p.64-77. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v49i0.66287>
- Mengistu, A.G.; Rensburg, L.D.; Mavimbela, S.S.W. 2017. The effect of soil water and temperature on thermal properties of two soils developed from aeolian sands in South Africa.

- Catena, v.158, p.184–193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.001>
- Minacapilli, M.; Cammalleri, C.; Ciraolo, G.; D'Asaro, F.; Iovino, M.; Maltese, A. 2012. Thermal Inertia Modeling for Soil Surface Water Content Estimation: A Laboratory Experiment. *Soil Science Society of America Journal*, v.76: p.92-100. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0122>
- Moran, M.S.; Scott, R.L.; Keefer, T.O.; Emmerich, W.E.; Hernandez, M.; Nearing, G.S.; Paige, G.B.; Cosh, M.H.; O'Neill, P.E. 2009. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.149, p. 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.07.004>
- Moura, M. R., DO Nascimento, F. A. O., Paolucci, L. N., Silva, D. P.; Santos, B. A. 2023. Pervasive impacts of climate change on the woodiness and ecological generalism of dry forest plant assemblages. *Journal of Ecology*, v.111, p.1762–1776. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14139>
- Oliveira, D.B.; Albuquerque Neto, N.A.; Soares, W.A. 2015. Estimativas da difusividade térmica e do fluxo de calor de um solo no agreste Pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 8, p.1053-1067. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20150053>
- Oliveira, T. S.; Carvalho, C.C.N.; Correia, C.C.; Fonseca, E.C.N.F.; Nunes, F. C. 2021. Avaliação da degradação de pasto nativo embasada em parâmetros de solo. *Diversitas Journal*, 6, 1871-1885. <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v6i2-1424>
- Querino, C.A.S.; Lopes Júnior, J. M.; Moura, M.A.L. 2022. Balanço de Radiação no Bioma Caatinga no Semiárido Alagoano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.15, n.06, p.2715-2729. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.6.p2715-2729>
- Ramana Rao, T. V.; Silva, B. B.; Moreira, A. A. 2005. Características térmicas do solo em Salvador, BA. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 09, n. 04, p. 554 – 559. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000400018>
- Roxy, M.S.; Sumithranand, V. B.; Renuka, G. 2010. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal diffusivity at Astronomical Observatory, Thiruvananthapuram, south Kerala. *Journal of Earth System Science*, v. 119, n.4, p. 507–517. <https://doi.org/10.1007/s12040-010-0038-1>
- Rózański, A.; Stefaniuk, D. 2016. Prediction of soil solid thermal conductivity from soil separates and organic matter content: computational micromechanics approach. *European Journal of Soil Science*, v. 67, n.5, p.551–563. <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.12368>
- Santos, C. M.; Souza, J. L.; Tiba, C.; Teramoto, E. T.; Melo, R. O. 2013. Estimativa da irradiação solar global horária a partir da temperatura do ar para o semiárido de Alagoas, Brasil. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.32, p. 19 – 28.
- Shukla, P.R.; Skea, J.; Slade, R.; Van Diemen, R.; Haughey, E.; Malley, J.; Pathak, M.; Portugal Pereira, J. 2019. Technical summary. In: Shukla, P.R., Skea, J., Buendia, E. C., Masson-Delmotte, V., Portner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., Diemen, R. Van, Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J.P., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., Malley, J. (Eds.), IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems, p. 36–74,
- Silans, A.M.B.P.; Monteny, B.A.; Lhomme, J.P. 1996. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEx-Sahel experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.81, p.201–216.
- Silva-Aguilar, O. F.; Andaverde-Arredondo, J.A.; Escobedo-Trujillo, B.A.; Benitez-Fundora, A.J. 2018. Determining the in situ apparent thermal diffusivity of a sandy soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, e0180025. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180025>
- Soares, W.A.; Antonino, A. C. D.; Lima, J.R.S.; Lira, C. A. B. O. 2014. Comparação de Seis Algoritmos para a Determinação da Difusividade Térmica de um Latossolo Amarelo. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.07, n.01, p.146-154. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.1.p146-154>
- Spitler, J. D.; Yavuzturk, C.; Rees, S. J. 2000. In situ measurement of ground thermal properties. In: *Proceedings of the Terrastock*, v.1, Stuttgart, p. 165-170.
- Tait-Mesbah, S.; Dufresne, J. L.; Cheruy, F.; Hourdin, F. 2015. The role of thermal inertia in the representation of mean and diurnal range of surface temperature in semiarid and arid regions. *Geophysical Research Letters*, v.42, p.7572–7580. <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL065553>

- Tessy Chacko, P.; Renuka, G. 2002. Temperature mapping, thermal diffusivity and subsoil heat flux at Kariavattom of Kerala. Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Earth Planet Sci.), v.111, n.1, p. 79–85. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02702224>
- Tong, B.; Xu, H.; Horton, R.; Bian, L.; Guo, J. 2022. Determination of Long-Term Soil Apparent Thermal Diffusivity Using Near-Surface Soil Temperature on the Tibetan Plateau. Remote Sens., v. 14, 4238. <https://doi.org/10.3390/rs14174238>
- Xavier, R.A.; Borges Neto, I.O.; Souza, J.J.L.L.; Cardoso, P.V.; Souza, J.O.P.; Souza, B.I. 2023. Processos de voçorocamento no Planalto da Borborema, semiárido da Paraíba. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 24, e2359. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2359>
- Zhang, T.; Osterkamp, T.E. 1995. Considerations in determining thermal diffusivity from temperature time series using finite difference methods. Cold Regions Science and Technology, v.23, p.333–341. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1995CRST...23..333Z/doi:10.1016/0165-232X\(94\)00021-O](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1995CRST...23..333Z/doi:10.1016/0165-232X(94)00021-O)
- Wang, J.; Bras, R. L.; Sivandran, G.; Knox, R. G. 2010. A simple method for the estimation of thermal inertia. Geophysical Research Letters, v.37, L05404. doi:10.1029/2009GL041851