



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Efeitos dos Aerossóis Atmosféricos sobre o Balanço de Energia em uma Região de Transição na Amazonia Legal

Leilane Gomes Duarte¹, Danielle Nassarden², Leone Francisco Amorim Curado³, Thiago Rangel Rodrigues⁴, Rafael Palácios⁵

¹ Dra. em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, CEP 78060-900. leilane@fisica.ufmt.br (autor correspondente). ² Dra. em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, CEP 78060-900. dany.nassarden93@gmail.com. ³ Professor Dr. Adjunto do Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, CEP 78060-900. leone.curado@fisica.ufmt.br. ⁴ Professor Dr. Adjunto, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, CEP 79070-900. thiago.r.rodrigues@ufms.br. ⁵ Professor Dr. Adjunto, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, CEP 66075-110. rafael.pgfa@gmail.com.

Artigo recebido em 25/08/2024 e aceito em 07/11/2024

RESUMO

A atuação dos aerossóis atmosféricos sobre a radiação solar incidente pode trazer fortes implicações para os ecossistemas e para o clima, isso porque essas partículas atuam diretamente absorvendo e espalhando a radiação solar. Nesse sentido, esse estudo realizou uma análise comparativa dos fluxos de energia sob diferentes condições atmosféricas, distinguindo entre céu-claro, com pouca influência do aerossol, e sob condições de aerossóis. Essa distinção foi realizada utilizando a profundidade ótica do aerossol (AOD). Foi utilizado o Método da Razão de Bowen para estimar os fluxos do balanço de energia. Em seguida, com os valores horários das variáveis foi realizado um ajuste polinomial de quarta ordem que permitiu realizar as estimativas sob condições de céu-claro. Por fim, realizou-se o cálculo do índice de claridade (kt) tanto para condições de céu-claro quanto sob condições de aerossóis. A análise horária mostrou que o saldo de radiação (Rn) e o fluxo de calor sensível (H), sob condições de aerossóis, apresentaram valores horários inferiores aos registrados sob condições de céu-claro. As diferenças observadas foram de 3,89 a 15,64 Wm⁻² para o Rn e de 9,00 a 28,13 Wm⁻² para o H. Por outro lado, tanto o fluxo de calor latente (LE) quanto o fluxo de calor no solo (G) registraram valores significativamente maiores quando comparados às estimativas sob condições de céu-claro. As diferenças observadas variaram de 1,36 a 31,71 Wm⁻² para o LE e de 20,62 a 133,23 Wm⁻² para o G. Quando considerado todo o período, sob condições de aerossóis, o saldo de radiação (Rn), o fluxo de calor latente (LE), o fluxo de calor sensível (H) e a radiação global (Rg) apresentaram valores que são 18,51, 15,17, 44,10 e 3,83 Wm⁻² menores, respectivamente, em comparação com os valores registrados sob condições de céu-claro. Enquanto isso, o fluxo de calor no solo (G) e o índice de claridade (kt) apresentaram maiores valores, com diferenças de 43,85 % e 6,86 %, respectivamente.

Palavras-chave: Aerossóis, Profundidade Óptica, Balanço de Energia, Método de Bowen, Radiação Global.

Effects of Atmospheric Aerosols on the Energy Balance in a Transition Region in the Legal Amazon

ABSTRACT

The effect of atmospheric aerosols on incident solar radiation can have strong implications for ecosystems and climate, since these particles act directly by absorbing and scattering solar radiation. In this sense, this study performed a comparative analysis of energy fluxes under different atmospheric conditions, distinguishing between clear skies, with little aerosol influence, and under aerosol conditions. This distinction was made using the aerosol optical depth (AOD). The Bowen Ratio Method was used to estimate the energy balance fluxes. Then, with the hourly values of the variables, a fourth-order polynomial adjustment was performed, which allowed the estimates to be made under clear sky conditions. Finally, the clarity index (kt) was calculated for clear sky and aerosol conditions. The hourly analysis showed that the radiation balance (Rn) and the sensible heat flux (H), under aerosol conditions, presented lower hourly values than those recorded under clear sky conditions. The observed differences were from 3.89 to 15.64 Wm⁻² for Rn and from 9.00 to 28.13 Wm⁻² for H. On the other hand, both the latent heat flux (LE) and the soil heat flux (G) registered significantly higher values than the estimates under clear sky conditions. The observed differences ranged from 1.36 to 31.71 Wm⁻² for LE and 20.62 to 133.23 Wm⁻² for G. When considering the entire period, under aerosol conditions, the net radiation (Rn), latent heat flux (LE), sensible heat flux (H), and global radiation (Rg) presented values that are 18.51, 15.17, 44.10, and 3.83 Wm⁻² smaller, respectively, in comparison with the values recorded under clear sky conditions. While this, the soil heat flux (G) and the clarity index (kt) presented higher values, with differences of 43.85 % and 6.86 %, respectively.

4513

and 3.83 Wm^{-2} lower, respectively, compared to the values recorded under clear sky conditions. Meanwhile, the soil heat flux (G) and the clarity index (kt) showed higher values, with differences of 43.85% and 6.86%, respectively.

Keywords: Aerosols, Optical Depth, Energy Balance, Bowen Ratio Method, Global Radiation.

Introdução

Aerossóis, partículas sólidas e líquidas dispersas na atmosfera, apresentam variabilidade significativa em forma, tamanho e composição química (Seinfeld; Pandis, 2016). Suas origens abrangem desde fenômenos naturais como erupções vulcânicas e tempestades de areia até atividades humanas, incluindo a queima de combustíveis fósseis e emissões industriais (Bond et al., 2013; Andreae, 2019; Artaxo et al., 2022). Essa diversidade de fontes resulta em variações nas concentrações e composições dos aerossóis, influenciando a interação da radiação solar com a atmosfera em diferentes escalas (Gubanova et al., 2023). Boucher et al. (2013) destacam o impacto significativo dos aerossóis no clima, particularmente por sua interação com as nuvens, onde atuam como núcleos de condensação e nucleação de gelo, conhecido como efeito indireto. Simulações sugerem que os aerossóis podem levar à formação de gotículas menores nas nuvens, alterando a cobertura e o ciclo de vida das nuvens e afetando a circulação atmosférica e o ciclo hidrológico (IPCC, 2021; Nabat et al., 2022). Além disso, os aerossóis interagem diretamente com a radiação solar, absorvendo e dispersando luz, além de emitir radiação térmica, o chamado efeito direto (Seinfeld; Pandis, 2016). Isso afeta o balanço de radiação, reduzindo a energia solar que chega à superfície terrestre e alterando os fluxos de calor latente e sensível (Murthy et al., 2014). Observações indicam que os aerossóis podem reduzir os fluxos de calor sensível em até 150 Wm^{-2} ao meio-dia, dependendo da profundidade óptica dos aerossóis (Mallet et al., 2009), e que a queima de biomassa pode diminuir esse fluxo em aproximadamente 60 Wm^{-2} (Feingold et al., 2005).

Estudos indicam variações significativas em variáveis meteorológicas como temperatura e déficit de pressão de vapor, além de interações com trocas de dióxido de carbono e fotossíntese (Cirino et al., 2014; Curado et al., 2024; Rodrigues et al., 2024). Em regiões tropicais, observa-se um aumento nos extremos climáticos, com algumas áreas de florestas tropicais apresentando elevações de temperatura superiores a $1,5^{\circ}\text{C}$ (Artaxo et al., 2022). A forte radiação direta dos aerossóis de queima de biomassa é particularmente pronunciada sobre florestas (Sena et al., 2013; Palácios et al., 2022a), e mudanças no uso da terra na Amazônia afetam a carga de aerossóis e o balanço de radiação,

bem como a absorção de carbono pela floresta (Artaxo et al., 2013; Morais et al., 2022; Franco et al., 2024). O Cerrado enfrenta degradação da vegetação nativa e aumento de incêndios florestais devido à expansão agrícola (Blanco et al., 2022), paralelamente a variações climáticas sazonais e interanuais (Hofmann et al., 2021; Palácios et al., 2023; Palácios et al., 2024).

Pesquisas apontam para um aumento generalizado no déficit de pressão de vapor e na evapotranspiração, reforçando tendências de ar mais seco no país (Palácios et al., 2023; Curado et al., 2023). O Estado de Mato Grosso, com aproximadamente 903.000 km^2 , é o terceiro maior estado brasileiro. Estrategicamente posicionado no centro geodésico da América Latina, Mato Grosso é notável por abrigar uma biodiversidade excepcional, sendo o único estado do país a englobar três dos cinco principais biomas nacionais: a Amazônia, o Cerrado e o Pantanal.

A queima de biomassa impacta diretamente esta região, em especial durante o período de estiagem, quando ocorre um significativo aumento na concentração atmosférica de partículas (Palácios et al., 2020; Palácios et al., 2022b; Palácios et al., 2024). Estudos aprofundados sobre a dinâmica dos fluxos de energia e suas interações com os aerossóis são essenciais para compreender as complexas relações entre solo, planta e atmosfera. Alterações na relação entre os fluxos de calor latente (LE) e o fluxo de calor sensível (H) podem provocar mudanças substanciais nos padrões de circulação de superfície, afetando o microclima das áreas vegetadas. Tais mudanças têm o potencial de influenciar o desenvolvimento regional e as propriedades do solo, conforme destacado em pesquisas anteriores (Leitão et al., 2000; Foley et al., 2003; Zhou et al., 2021; Zhou et al., 2022; Zhang et al., 2023; Rodrigues et al., 2024).

O objetivo deste trabalho foi investigar o impacto da presença de aerossóis no balanço de energia, na radiação global (R_g) e no índice de claridade (kt) em uma área específica da Amazônia Legal, localizada na Fazenda Miranda em Cuiabá-MT. Para alcançar este objetivo, foi quantificada a profundidade óptica do aerossol (AOD) e os focos de queimadas. Em seguida, foi realizada a quantificação dos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), utilizando medições de temperatura

(T), umidade relativa (UR) e fluxo de calor no solo (G), aplicando o Método de Bowen. Foi utilizado um modelo para simulação de um cenário hipotético de fluxos de energia estimados pelo Método de Bowen sob condições de céu-claro. Também foi analisado a dinâmica horária do balanço de energia, da radiação global (R_g) e do índice de claridade (kt) sob condições de aerossóis e sob condições de céu-claro. Por último, foi calculado o índice de claridade sob ambas as condições atmosféricas, com o intuito de compreender as variações causadas pela presença de aerossóis na região estudada.

Material e métodos

Área de estudo

Este estudo foi realizado na Fazenda Miranda, situada no município de Cuiabá, capital do Estado de Mato Grosso. A fazenda encontra-se geograficamente posicionada a $15^{\circ}43'S$ e $56^{\circ}04'W$ Oeste, apresentando uma altitude de 157 metros acima do nível do mar (conforme ilustrado na Figura 1). A propriedade ocupa uma área de transição ecológica entre os biomas Cerrado e Pantanal, estando a cerca de 20 km da cidade de Cuiabá, e integra a região conhecida como Amazônia Legal (representada na Figura 1). A vegetação predominante na área é marcada pela presença de árvores de pequeno porte com galhos tortuosos, intercalada por zonas de pastagem e áreas sujeitas a inundações periódicas.

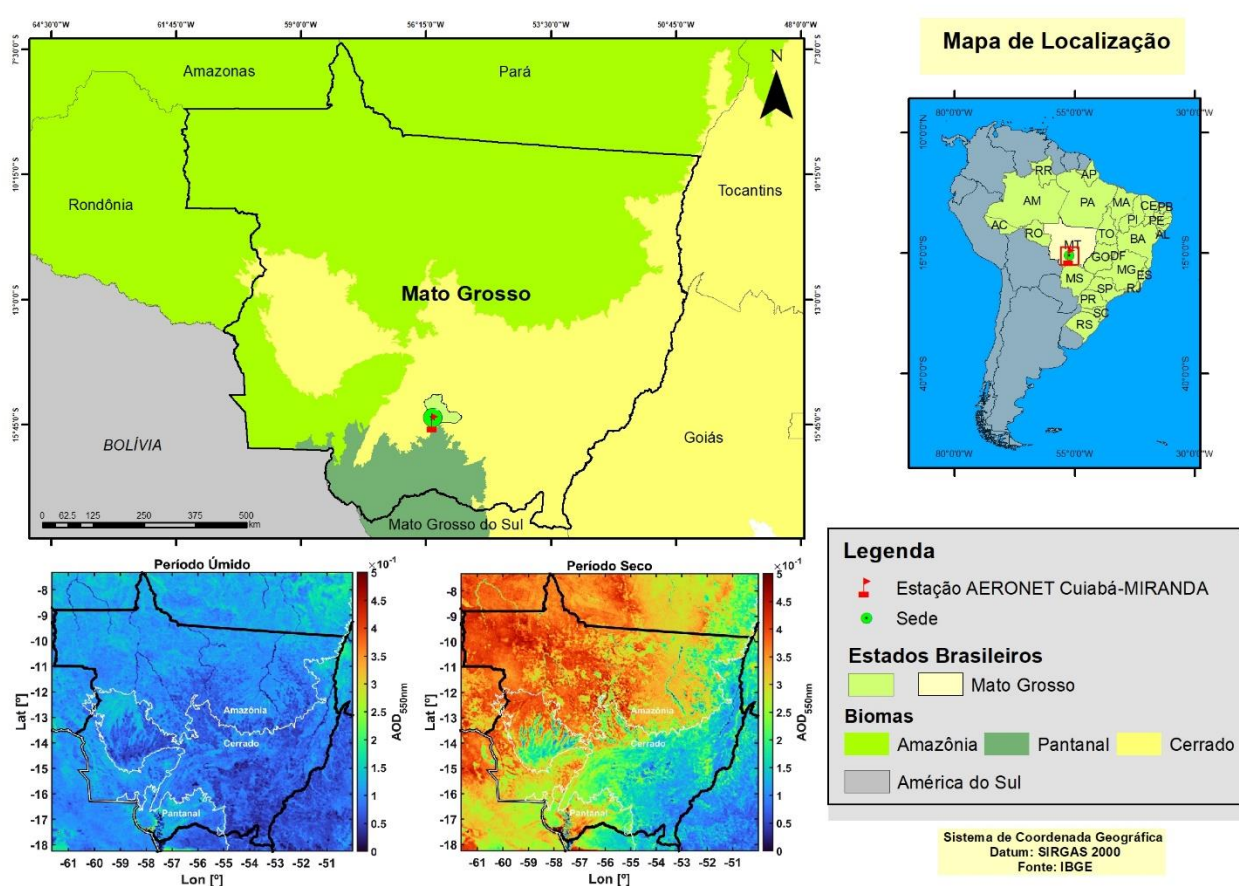


Figura 1. Localização geográfica da torre micrometeorológica para o monitoramento dos fluxos de energia, e medidas de aerossóis pela rede AERONET em Cuiabá. Os quadros inferiores também mostram a caracterização da distribuição espacial da profundidade ótica do aerossol (AOD) sobre o estado de Mato Grosso.

Conforme a classificação climática proposta por Koeppen e Pérez (1948), o clima da área estudada é categorizado como Aw, o que

indica um clima tropical semiúmido. A região possui duas estações bem definidas: uma estação seca que abrange o outono e o inverno (de abril a

setembro), e uma estação úmida que corresponde à primavera e ao verão (de outubro a março), tal como observado em estudos anteriores realizados por Rodrigues et al. (2014) e Sabino et al. (2022).

As temperaturas médias mínimas na região são de aproximadamente 10°C, enquanto as máximas podem chegar a até 41°C. O regime de chuvas mostra variações expressivas entre as estações, com uma maior incidência de precipitações durante o verão. A precipitação média anual na região é de cerca de 1750 mm, conforme indicado por Novais et al. (2016).

Dados micrometeorológicos

O presente estudo foi embasado em dados coletados ao longo do período de janeiro de 2009 a dezembro de 2019. Os dados micrometeorológicos foram obtidos através de sensores distribuídos em uma torre em três diferentes alturas. Esta torre (Figura 1) foi implementada como parte do projeto "Implantação de Postos de Observação de Gases de Traço e de Aerossóis na Atmosfera em Mato Grosso" (MCT-CNPq-CT Infra CT Energ n. 07-2006). O Saldo de radiação (R_n), utilizando o NR LITE (Kipp & Zonen Delft, Inc., The Netherlands), posicionado a uma altura de 5 metros; Radiação global (R_g), mensurada com piranômetros Kipp and Zonen modelo CM-21, parte da Rede SolRad-Net, posicionados ao nível do solo; Temperatura do ar (T) e umidade relativa do ar (UR), aferidas por três termohigrômetros HMP45AC (Vaisala, Inc., Helsinki, Finland), localizados a alturas de 5, 10 e 18 metros; Fluxo de calor no solo (G), medido por duas placas de fluxo de calor modelo HFP01-L20 (Hukseflux Thermal Sensors B.V., Delft, The Netherlands), instaladas a uma profundidade de 1,0 cm.

Dados de profundidade óptica dos aerossóis (AOD)

A AERONET (AErosol RObotic NETwork) é uma rede global dedicada ao monitoramento de aerossóis via sensoriamento remoto. Com mais de 200 estações ao redor do mundo, incluindo nove no Brasil e cinco na Bacia Amazônica, a AERONET efetua medições regulares desde 1999. Os dispositivos, posicionados ao nível do solo, são gerenciados pelo Sistema de Observação da Terra da NASA/GSFC (National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flight Center) (Holben et al., 1998). Os equipamentos empregados pela AERONET são radiômetros espectrais automáticos e padronizados, do modelo

CE318A (Cimel Electronique, França), distribuídos por diversas regiões do globo.

As medições efetuadas por esses instrumentos permitem o monitoramento quase em tempo real de uma série de características dos aerossóis atmosféricos, abrangendo a profundidade óptica (AOD), a coluna de água precipitável, as distribuições de tamanho das partículas de aerossóis e o albedo de espalhamento único, entre outros parâmetros relevantes. Dados provenientes da AERONET estão disponíveis online, abrangendo informações completas sobre o sistema (Schafer et al., 2008). A AERONET classifica seus dados em três níveis: nível 1.0 para dados brutos, nível 1.5 para dados filtrados de contaminação por nuvens, e nível 2.0 para dados com certificação de qualidade. Estes dados abrangem oito comprimentos de onda distintos: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 e 1020 nm. Para este estudo, foram empregados dados de nível 2.0, especificamente para o comprimento de onda de 500 nm, correspondente ao pico do fluxo radiativo solar na atmosfera.

Balanco de energia estimado pelo Método de Bowen

No contexto da estimativa dos fluxos de calor em superfícies terrestres, o balanço de energia é frequentemente simplificado pela soma dos fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e o fluxo de calor do solo (G), conforme expresso na Equação 1.

$$R_n = H + LE + G \quad (01)$$

Nesta equação, R_n é o saldo de radiação, H é a densidade de fluxo de calor sensível, LE é a densidade de fluxo de calor latente, G é a densidade de fluxo de calor no solo, todos em Wm^{-2} . Para a estimativa dos componentes (LE) e (H) a partir do saldo de radiação, recorre-se ao método da razão de Bowen (β), definido pela relação entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE) (Bowen, 1926), como ilustrado na Equação 2.

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (02)$$

Considerando um intervalo de tempo médio (t) entre 20 e 60 minutos, é possível estabelecer relações empíricas entre os fluxos de energia e os gradientes verticais de temperatura e pressão de vapor, tal como descrito pelas Equações 3 e 4.

$$LE = -\rho C_p K_w \frac{\Delta e}{\Delta z} \quad (03)$$

$$H = -\rho C_p K_s \frac{\Delta T}{\gamma \Delta z} \quad (04)$$

Nestas equações, (C_p) é o calor específico do ar à pressão constante ($1010 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$), ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}), γ é a constante psicométrica (kPa °C^{-1}), K_w e K_s são os coeficientes de difusividade turbulenta para o calor latente e sensível, respectivamente ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), ΔT o gradiente de temperatura entre dois níveis de altura (°C) e Δe é o gradiente de pressão de vapor de água entre os mesmos níveis de altura (kPa). O termo Δz refere-se à diferença de altura no perfil atmosférico onde ocorrem as medições de temperatura. Para a obtenção da razão de Bowen (β) considerando que os coeficientes de difusividade turbulenta (K_s) e (K_w) são iguais conforme Verma et al. (1978), aplicam-se as Equações 3 e 4 na Equação 2, resultando na Equação 5:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (05)$$

O valor da constante psicométrica (γ) é dado pela relação entre o calor específico do ar (C_p), a pressão atmosférica (p) e o calor latente de vaporização (L) (kJ kg^{-1}), conforme a Equação 6:

$$\gamma = \frac{C_p p}{0,622 L} \quad (06)$$

A pressão de vapor atmosférica é obtida por meio da umidade relativa (UR) (Equação 7), devido à relação entre a pressão atual de vapor de água (e) e a pressão de saturação de vapor de água (e_s), dada em função (Equação 8):

$$UR = \frac{e}{e_s} 100 \quad (07)$$

$$e_s = 0,6108 e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \quad (08)$$

Após obter a razão de Bowen (Equação 5), aplicando-se a Equação 2 na Equação 1, adquirem-se os fluxos de calor sensível (Equação 9) e calor latente (Equações 10):

$$H = (Rn - G) \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (09)$$

$$LE = \frac{(Rn - G)}{\beta + 1} \quad (10)$$

Para evitar inconsistências físicas nas estimativas feitas pelo Método da Razão de Bowen (β) Perez et al. 1999 descrevem uma série de critérios que devem ser utilizados para a determinação correta dos fluxos estimados pela razão de Bowen para o fluxo de calor latente (LE) e calor sensível (H). Segundo os autores, sugere-se que valores que não respeitem essas condições devem ser descartados. Portanto, neste estudo, foram mantidos apenas dados consistentes com os critérios de correções de Perez.

Determinação dos fluxos sob condições de céu claro

Para a estimativa dos fluxos de energia sob condições de céu claro, foram utilizadas medidas de radiação global (R_g) e profundidade óptica de aerossóis (AOD) em 500 nm, provenientes da rede AERONET 2.0 (dados cloudless) (Rodrigues et al., 2024), bem como saldo de radiação (R_n) e fluxo de calor no solo (G) de uma torre micrometeorológica. O fluxo de calor latente (LE) e o fluxo de calor sensível (H) foram estimados utilizando o método de razão de Bowen, ajustado às condições propostas por Perez. As variações diárias dessas variáveis foram modeladas por meio de um ajuste polinomial de quarta ordem, similar à Equação 11, para cada mês:

$$S_o(t) = at^4 + bt^3 + ct^2 + dt + e \quad (11)$$

Na equação 11, (a), (b), (c), (d), e (e) são coeficientes da curva polinomial que representam as densidades dos fluxos sob condições de céu claro em função do tempo (t). Nota-se que a rede AERONET descarta medidas sob alta cobertura de nuvens, garantindo assim a coleta de dados sob céu aberto e sem influência de nuvens, permitindo a quantificação isolada do efeito dos aerossóis no balanço de energia. Tal metodologia assemelha-se àquela empregada por Rodrigues et al. (2024).

O valor de referência utilizado para determinar se as condições eram de céu-claro ou não foi o primeiro quartil (Q1) para os meses de agosto a outubro, os quais pertencem ao período de seca na área de estudo. O Q1 demarca o limite dos 25% menores valores de AOD nesse intervalo. Esse valor foi estabelecido como referência para condições de céu claro. Os dados foram então segmentados em dois grupos: valores de AOD

iguais ou abaixo de 0,15 foram classificados como céu-claro, enquanto valores acima de 0,15 foram considerados sob condições de aerossóis.

Determinação do índice de claridade

A determinação do índice de brilho, representado por kt , iniciou-se com o cálculo da irradiação solar extraterrestre S_{ext} baseada exclusivamente em parâmetros orbitais. O índice kt atua como um coeficiente de proporcionalidade entre a radiação solar direta medida na superfície e S_{ext} indicando a transmissividade atmosférica. Em contraste, o parâmetro f mostra-se mais sensível à presença de aerossóis e nuvens que afetam a dispersão da radiação solar. Utilizando kt e o ângulo zenital solar (SZA) como preditores, foi possível estimar o componente difuso da radiação. Para calcular S_{ext} são necessários parâmetros como a constante solar I_o , a latitude ϕ , a declinação solar δ , o ângulo horário h e a distância média entre a Terra e o Sol, conforme Gates (1980). As Equações 12 e 13 permitiram o cálculo de kt :

$$kt = \frac{S_o}{S_{ext}} \quad (12)$$

$$S_{ext} = I_o \left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^2 \cos(SZA) \quad (13)$$

Onde I_o é a constante solar terrestre aproximadamente 1367 Wm^{-2} (Bai et al. 2012).

Resultados e discussão

Variabilidade da profundidade Óptica dos aerossóis (AOD) e do número de focos de queimadas

As médias mensais de focos de queimadas atingiram seus maiores valores na Amazônia Legal em agosto 28.243 ± 15.835 , setembro $37.596,81 \pm 15.987,20$ e outubro $19.294,54 \pm 5.153,05$. No Cerrado, os picos ocorreram também em agosto $14.362,70 \pm 8.188,35$, setembro $22.316,60 \pm 12.277,60$ e outubro $11.223,50 \pm 4.905,10$. No Pantanal, os valores máximos foram observados em agosto $988,36 \pm 763,41$, com um aumento significativo em setembro $1.685,55 \pm 952,56$, seguido de uma diminuição em outubro $867,00 \pm 594,01$.

A mediana de AOD acompanhou essa tendência, com valores de 0,152 em agosto, um pico de 0,464 em setembro e uma queda para 0,317

em outubro, conforme detalhado na Tabela 1 e ilustrado na Figura 2. Os dados evidenciam variações sazonais marcantes, com picos de queimadas e profundidade óptica (AOD). Observa-se que os picos de AOD ocorrem de agosto a outubro, coincidindo com o aumento das queimadas de biomassa nesse período, conforme estudos de Romera et al. (2019) e Moraes et al. (2022).

Trabalhos anteriores, incluindo Palácios et al. (2020) e Palácios et al. (2016), indicam que as queimadas no sul da Amazônia influenciam diretamente a distribuição espacial de AOD a 500 nm na área analisada. Há uma correlação direta entre AOD e as queimadas na Amazônia e no Cerrado. Assim, o número de focos de queimadas no Cerrado, Pantanal e Amazônia Legal foi relevante, dado que a circulação atmosférica transporta aerossóis tanto internamente quanto de áreas vizinhas ao estado de Mato Grosso.

O estudo de Palácios et al. (2022c) destaca que, apesar de não estar no arco do desmatamento amazônico, o local apresenta valores de AOD comparáveis aos dessa área.

Tabela 1. Valores de médias, medianas e desvios padrão mensais de profundidade óptica (AOD). Período entre 2009 e 2019.

Mês	Média	Desvio	Mediana
Janeiro	0,100	0,053	0,089
Fevereiro	0,089	0,059	0,083
Março	0,084	0,043	0,074
Abril	0,082	0,037	0,074
Maio	0,090	0,045	0,080
Junho	0,084	0,034	0,076
Julho	0,099	0,043	0,092
Agosto	0,230	0,277	0,152
Setembro	0,699	0,652	0,464
Outubro	0,374	0,267	0,317
Novembro	0,151	0,114	0,119
Dezembro	0,153	0,088	0,127

Fluxos de energia sob condições de céu-claro

Realizou-se um ajuste polinomial de quarta ordem para modelar o ciclo diário dos fluxos de energia sob condições de céu-claro, gerando equações análogas à equação polinomial de quarto grau. Utilizou-se as equações para estimar os fluxos em um dia representativo do comportamento das variáveis sob céu-claro, das 7h às 17h (horário

local, t), para cada mês do período do período selecionado.

A Tabela 2 mostra os coeficientes dos ajustes polinomiais de quarta ordem entre os fluxos de energia e a hora do dia. Para esses ajustes a condição de céu claro foi determinada para valores de AOD menores ou iguais 0.71, o R^2 foi superior a 0.98. Esses ajustes foram utilizados para gerar um modelo médio do comportamento dos fluxos em condições de céu claro.

O saldo de radiação (R_n) sob influência de aerossóis mostrou-se reduzido, com diferenças de $5,22 \text{ Wm}^{-2}$ a $118,12 \text{ Wm}^{-2}$ abaixo dos valores sob céu-claro, representando diferenças percentuais de 7,60% a 44,67%. Tais resultados corroboram com os de Steiner et al. (2013), que indicam diminuições de R_n de 6% a 65% devido à presença de aerossóis. A absorção e o espalhamento da radiação solar por essas partículas diminuem a

radiação solar direta na superfície e elevam a fração de radiação difusa, conforme Zhang et al. (2010), Forster et al. (2007), Zhou et al., 2022, Zhang et al., 2023 e Rodrigues et al. (2024).

Em condições de céu-claro, H excede LE em determinados períodos do dia (Figura 3). Nota-se que LE e H apresentam comportamentos opostos ao longo do dia, tanto sob céu claro quanto sob influência de aerossóis. Durante o período analisado das 9 às 16 horas, o fluxo de calor sensível (H) sob influência de aerossóis mostrou-se de 14,09% a 53,92% inferior ao H sob céu-claro. As diferenças variaram de $13,60 \text{ Wm}^{-2}$ a $107,87 \text{ Wm}^{-2}$. Em contraste, o fluxo de calor latente (LE) sob condições de aerossóis foi maior que o LE sob céu-claro, com valores de 8,26% a 36,12%, equivalentes a diferenças de $10,21 \text{ Wm}^{-2}$ a $64,33 \text{ Wm}^{-2}$ no mesmo intervalo de tempo.

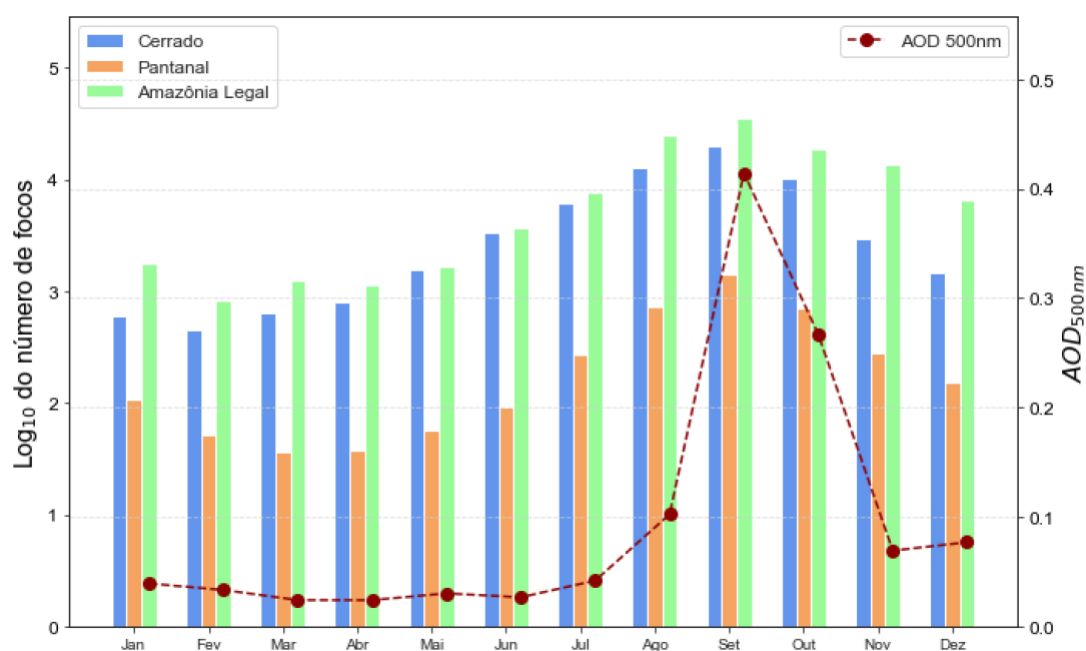


Figura 2. Medidas de médias mensais de focos de queimadas para Amazônia Legal, Cerrado e Pantanal e as medidas de AOD no local de estudo Cuiabá-Miranda (2009-2019).

A estimativa dos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) pelo Método de Bowen não se baseia exclusivamente no saldo de radiação (R_n), mas também contempla variáveis como o fluxo de calor no solo (G), umidade relativa do ar (UR), temperatura do ar (T) e o gradiente de pressão de vapor no ar (Δe). O trabalho de Rodrigues et al. (2023) destacou mudanças estatisticamente significativas em Δe relacionadas ao aumento na

concentração de aerossóis derivados de queimadas na região Amazônica.

O fluxo de calor no solo (G) apresentou diferenças percentuais que variam de 1,08% a 41,58%, o que se traduz em valores menores que vão desde $0,72 \text{ Wm}^{-2}$ até $38,86 \text{ Wm}^{-2}$ sob condições de aerossóis.

Análise horária radiação global e índice de claridade

No período de estiagem, especificamente no intervalo das 7 às 10 horas, os valores de radiação global (Rg) sob condições de presença de aerossóis foram superiores aos valores estimados para condições de céu claro. As diferenças percentuais observadas oscilaram entre 1,30% e 14,33%, o que corresponde a variações desde 9,65 Wm⁻² até 33,11 Wm⁻². Em ambas as condições atmosféricas, tanto sob céu claro quanto sob influência de aerossóis, os valores máximos de Rg foram registrados às 11 horas. O valor máximo de Rg sob céu claro alcançou 803,94 Wm⁻², enquanto sob condições de aerossóis foi de 794,44 Wm⁻².

Após as 11 horas, a radiação global (Rg) sob condições de aerossóis apresentou valores

inferiores, com diferenças percentuais entre 1,18% e 2,16%, equivalentes a variações de 3,81 Wm⁻² a 15,98 Wm⁻², quando comparadas às condições de céu claro, até às 15 horas. A partir das 16 horas, a radiação global (Rg) sob condições de aerossóis superou os valores sob condições de céu claro, apresentando uma diferença significativa que ultrapassou os 13,55%. O índice de claridade (kt) sob condições de aerossóis registrou valores inferiores, com diferenças que variaram de 0,58% a 5,28% em relação ao kt sob condições de céu claro, o que corresponde a variações entre 0,004 e 0,026 no período entre 8 e 14 horas.

Tabela 2. Coeficientes do ajuste polinomial de quarta ordem para os fluxos de energia em função da hora do dia. Equação de ajuste: $Fluxo(t) = at^4 + bt^3 + ct^2 + dt + e$.

Fluxo	Coefficiente	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto
Rn (t)	a	0,30	0,28	0,39	0,31	0,19
	b	-14,06	-13,15	-18,81	-15,12	-9,29
	c	214,327	194,72	300,86	240,77	136,66
	d	-1162,60	-995,21	-1864,56	-1450,44	-642,76
	e	1816,82	1280,32	3829,33	2803,10	552,30
LE (t)	a	0,29	-0,07	0,10	0,18	-0,15
	b	-13,51	3,72	-4,77	-8,52	8,27
	c	212,57	-73,98	67,95	138,14	-161,83
	d	-1306,34	681,87	-334,95	-900,20	1388,26
	e	2730,88	-2204,08	430,08	2057,80	-4167,53
H (t)	a	0,02	0,08	0,46	0,06	0,44
	b	-1,18	-4,32	-22,20	-3,54	-22,28
	c	16,76	67,21	375,92	58,92	390,32
	d	-32,17	-353,36	-2647,41	-331,30	-2836,35
	e	-218,28	461,20	6619,65	491,63	7289,85
G (t)	a	-0,03	0,35	0,03	0,33	0,10
	b	1,37	-16,40	-1,98	-1,79	-5,35
	c	-24,97	267,72	33,58	31,27	92,51
	d	225,40	-1828,82	-210,29	-196,84	-646,25
	e	-756,44	998,67	392,21	351,62	1546,69

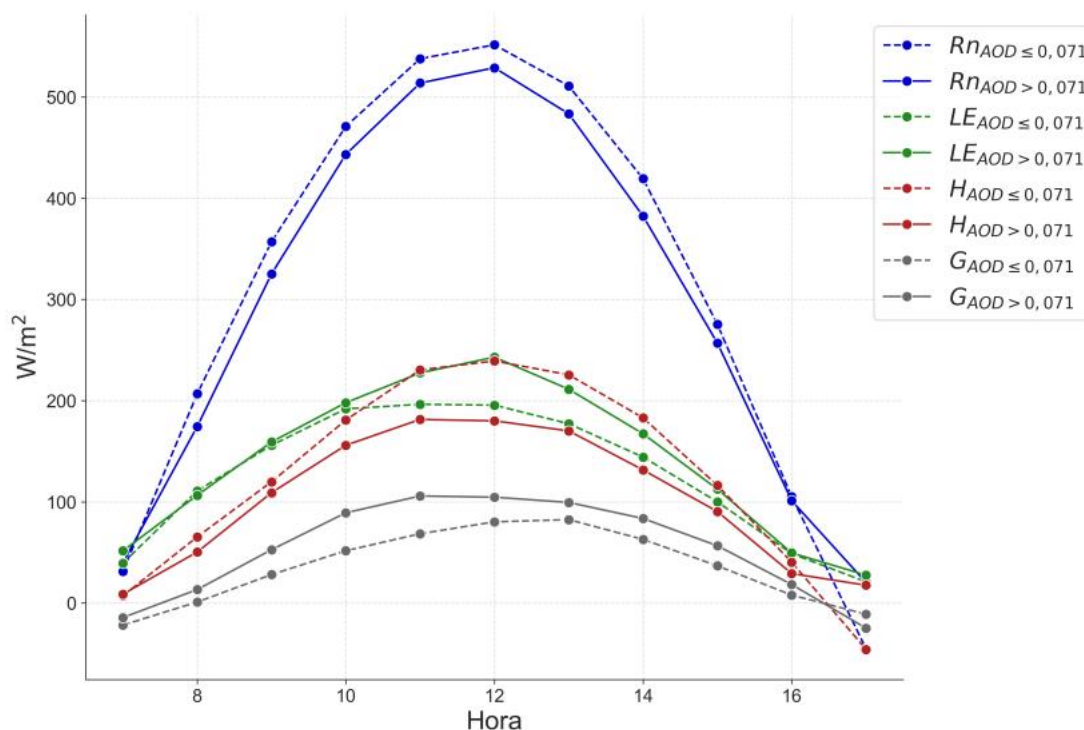


Figura 3. Dinâmica horária do balanço de energia sob diferentes condições atmosféricas durante o período analisado. Na legenda, a notação $AOD \leq 0,071$ representa as condições de céu claro para os fluxos, já a notação $AOD > 0,071$ representa as condições de aerossol para os fluxos.

Análise dos box-plot horários das componentes sob condições de aerossóis

Para a análise da distribuição horária e avaliação da tendência central e variabilidade dos dados, empregamos a técnica de boxplots. Esta metodologia foi aplicada às variáveis saldo de radiação (Rn) (Figura 4), fluxo de calor latente (LE) (Figura 5), fluxo de calor sensível (H) (Figura

6), fluxo de calor no solo (G) (Figura 7) e índice de claridade (kt) (Figura 8), sob condições atmosféricas influenciadas por aerossóis. Os gráficos gerados destacam estatísticas fundamentais, incluindo o primeiro quartil (Q1), o terceiro quartil (Q3) e o intervalo interquartil (IQR).

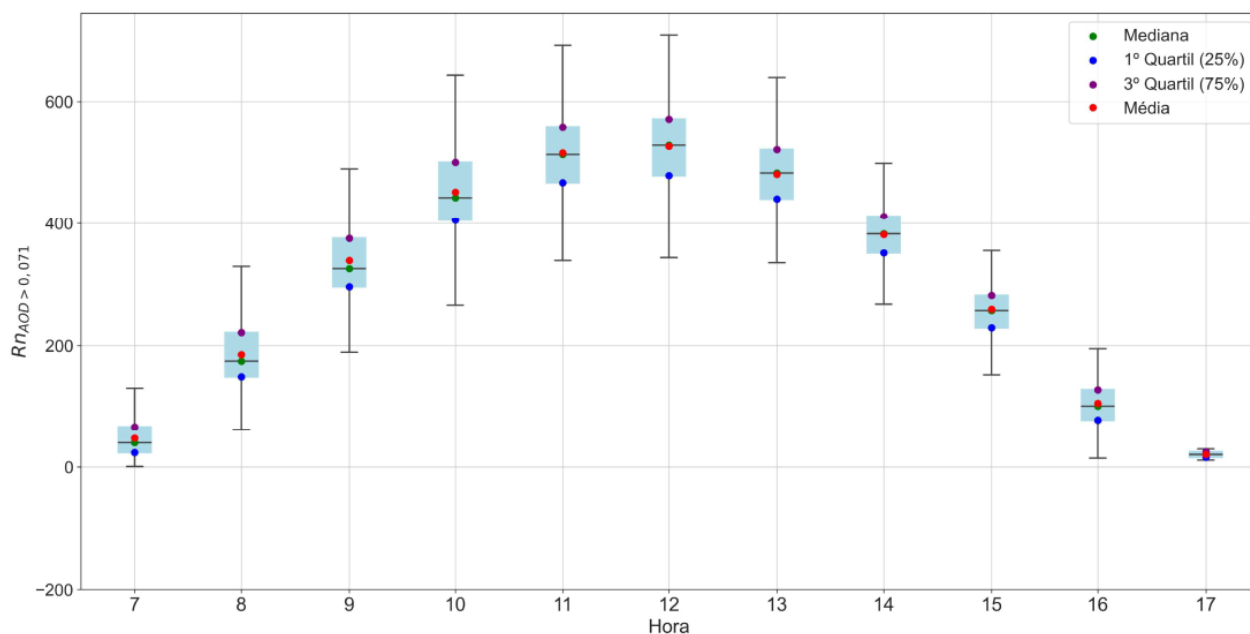


Figura 4. Boxplots do saldo de radiação (R_n) dos dados sob condições de aerossóis entre 7 e 17 horas.

A análise do saldo de radiação (R_n) revela maior dispersão entre 9 e 12 horas, com IQRs de 117,54 a 147,86 e altos desvios padrão, refletindo variabilidade significativa. Os valores de médias e medianas são bem próximos indicando uma distribuição simétrica. Para radiação global (R_g), a mediana é maior que a média entre 10 e 15 horas, sugerindo a presença de valores abaixo do limite inferior. O IQR é alto neste período, variando entre 120,21 e 176,82 o que indica variabilidade dos dados nesse intervalo específico.

Tanto o fluxo de calor latente (LE) quanto o fluxo de calor sensível (H), Figuras 5 e 6, apresentam os maiores intervalos interquartílicos (IQRs) entre 8 e 14 horas, com o LE variando de 129,60 a 208,08 e o H de 106,60 a 202,02 assim

como os valores de desvios padrão, refletindo alta dispersão dos dados neste intervalo. Já o fluxo de calor no solo (G) apresenta os maiores valores de IQRs entre 8 e 13 horas, com valores entre 28,37 e 60,33 os quais coincidem com os maiores de desvio padrão.

A análise do índice de claridade (kt), apresentam médias com valores abaixo das medianas no período das 8 às 15 horas, o que sugere a presença de valores discrepantes abaixo do limite inferior. Observou-se também que o intervalo interquartílico (IQR) mais amplo ocorre entre 8 e 15 horas, oscilando de 0,10 a 0,15, o que aponta para uma maior dispersão e variabilidade dos dados nesse horário específico.

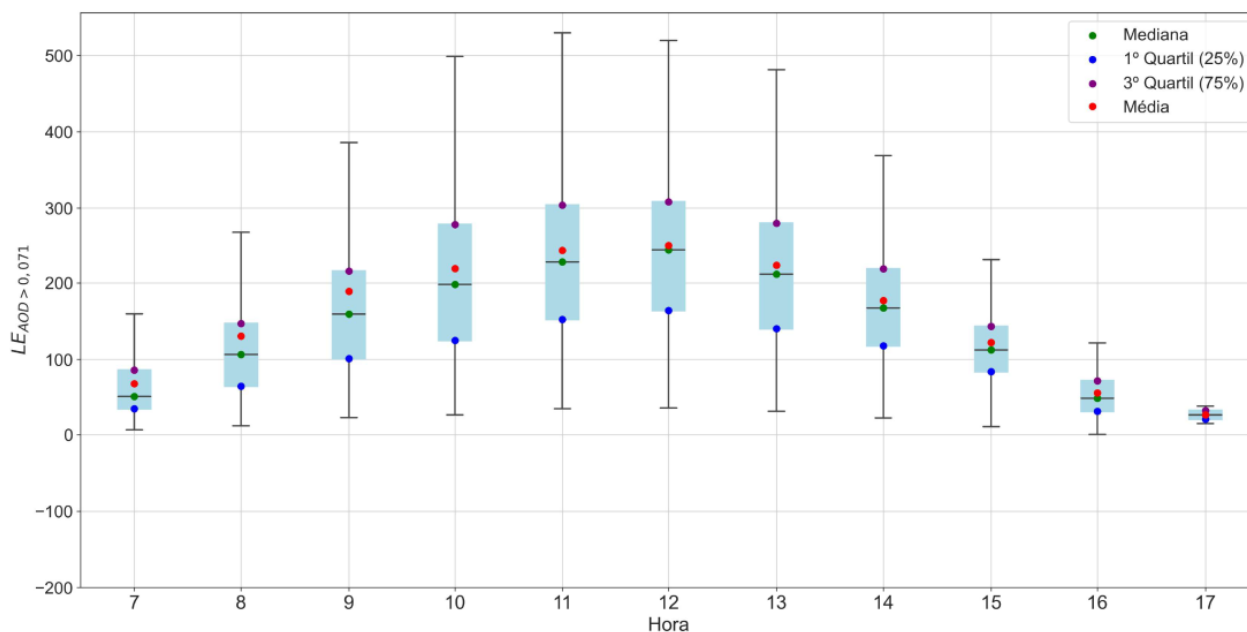


Figura 5. Boxplots do fluxo de calor latente (LE) sob condições de aerossóis entre 7 e 17 horas.

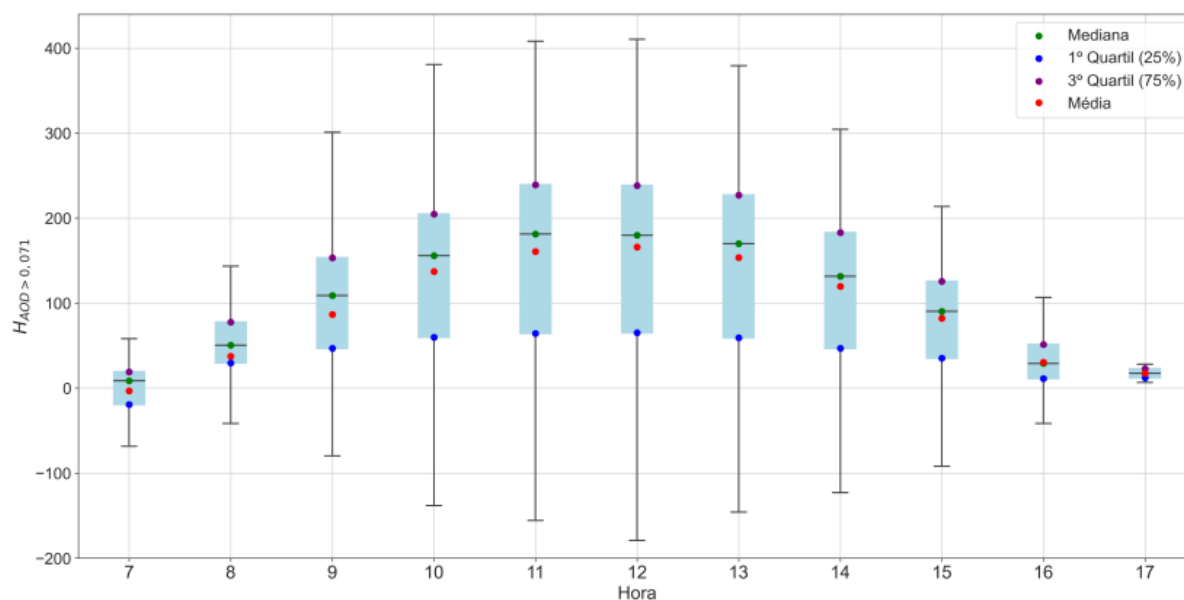


Figura 6. Boxplots do fluxo de calor latente (H) sob condições de aerossóis entre 7 e 17 horas.

As médias do fluxo de calor no solo (G), Figura 7, superam as medianas ao longo do dia, indicando a presença acima do limite superior. O período entre 9 e 12 horas apresenta os maiores IQRs, entre 54,12 e 65,82, apontando para uma elevada variabilidade e dispersão dos dados nesse intervalo.

Já o índice de claridade (kt), como mostra a Figura 8, apresenta médias abaixo das medianas entre 12 e 14 horas, sugerindo discrepâncias abaixo do limite inferior. O maior IQR ocorre entre 9 e 13 horas, variando de 0,13 a 0,16, indicando maior dispersão e variabilidade dos dados nesse intervalo.

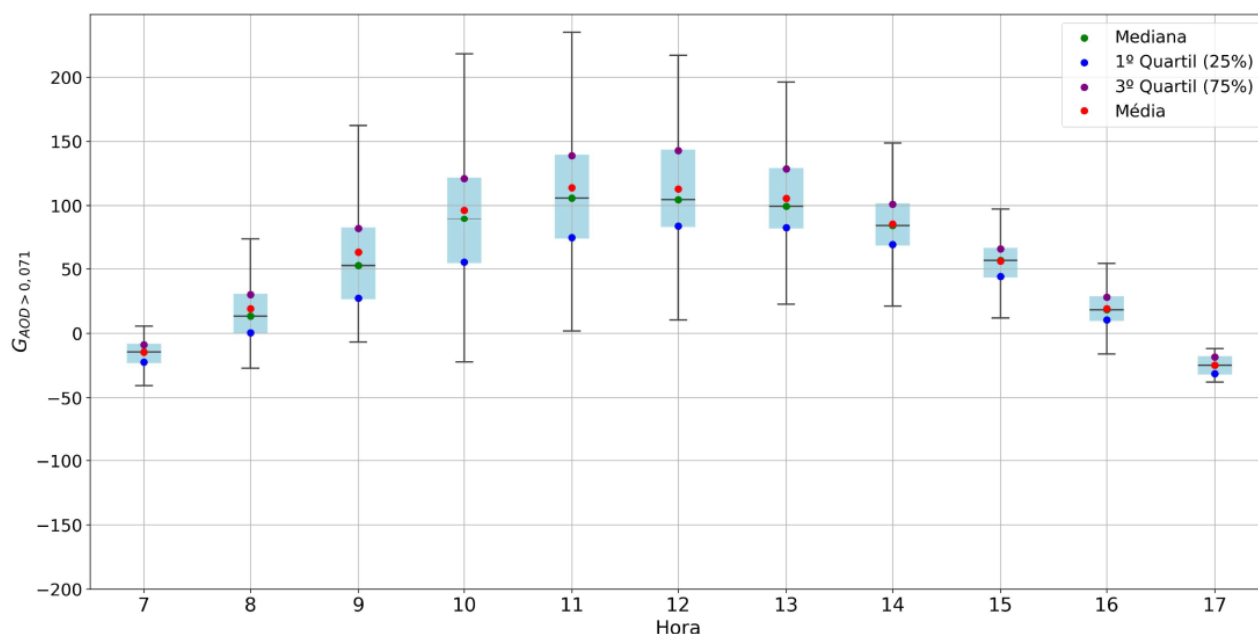


Figura 7. Boxplots do fluxo de calor no solo (G) sob condições de aerossóis entre 7 e 17 horas.

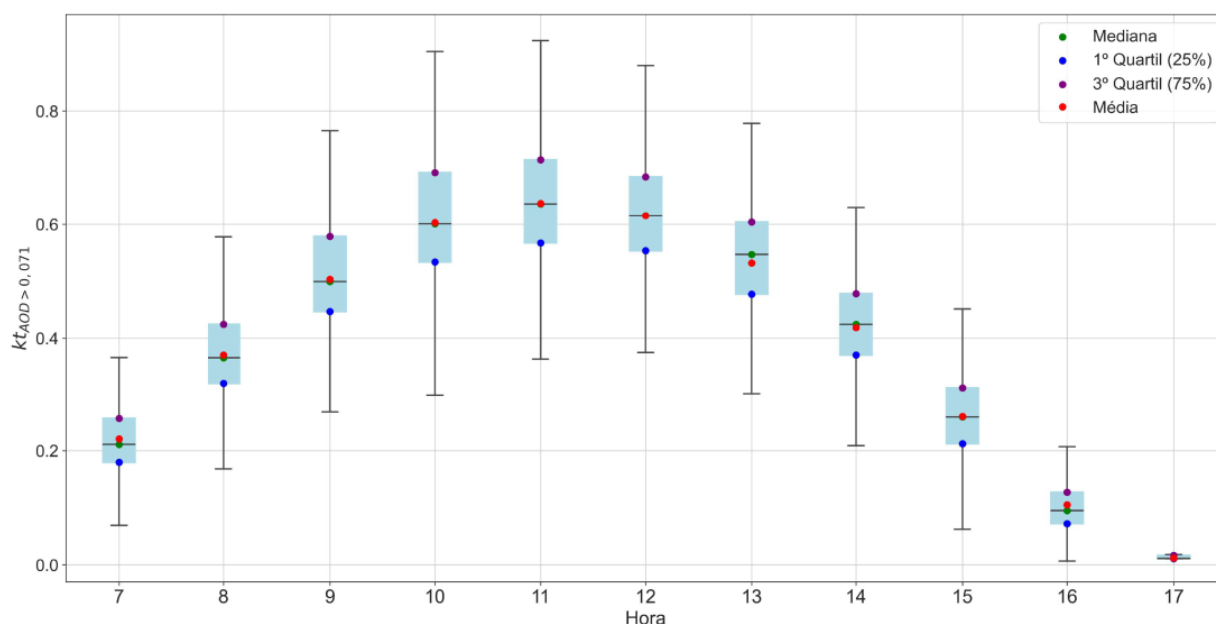


Figura 8. Boxplots do índice de claridade (kt) sob condições de aerossóis entre 7 e 17 horas.

O teste de Mann-Whitney foi aplicado para detectar diferenças estatísticas entre as medianas sob condições de céu-claro ($AOD \leq 0,071$) e sob condições de aerossóis ($AOD > 0,071$). Aplicado às componentes do balanço de energia, resultou em p-valores abaixo de 0,05, evidenciando diferenças estatisticamente significativas entre as medianas das amostras. Sob condições de céu-claro, as medianas de R_n , H e R_g superaram as médias,

conforme a Tabela 3, indicando valores abaixo do limite inferior, o que diminui a média. Em contraste, as médias de LE , G e kt foram maiores que as medianas, sugerindo outliers acima do limite superior, aumentando a média. Já as médias do fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G) mostrou-se maior em relação à mediana para o conjunto sob condições de aerossóis. Também foi observado que

os valores das medianas encontrados para o saldo de radiação (Rn) e índice de claridade (kt) foram superiores aos valores das médias, conforme detalhado na Tabela 3.

Sob condições de aerossóis durante o período estudado, observou-se que a mediana do Rn e da Rg apresentaram valores reduzidos em 18,51% e 3,83%, respectivamente, em comparação às condições de céu-claro (Tabela 3). Essas reduções correspondem a diferenças de 67,27 Wm⁻² para Rn e de 22,72 Wm⁻² para Rg.

De maneira similar, as componentes de LE e H exibiram valores diminuídos, com diferenças percentuais de 15,17% e 44,10%, respectivamente. Tais diferenças traduzem-se em uma diferença de 25,88 Wm⁻² para LE e de 63,78 Wm⁻² para o H. Enquanto isso, o fluxo de calor no solo evidenciou um valor maior, significativo, de 43,85%, o que representa um incremento de 19,77 Wm⁻². Já o kt registrou um valor superior de 6,86%, equivalente a um aumento de 0,03.

Tabela3. Estatísticas descritivas para os fluxos de energia (Wm⁻²) e índice de claridade nas condições de céu claro e sob as condições de aerossóis.

	Condições de céu claro				Condições de aerossóis			
	Média(desvio)	Mediana	Q1	Q3	Média(desvio)	Mediana	Q1	Q3
Rn	396(171)	430	269	531	340(169)	363	202	476
H	127(136)	144	52	215	100(105)	80	37	173
LE	214(154)	169	108	272	172(123)	143	80	235
G	53(47)	45	18	80	68(56)	64	25	100
Rg	567(253)	615	396	757	552(243)	593	361	741
kt	0,45(0,21)	0,49	0,30	0,61	0,44(0,20)	0,46	0,29	0,59

Regressão linear sob diferentes condições atmosféricas

O valor de R² de 0,99, observado tanto na Figura 9 quanto na Figura 10, indica uma

correlação extremamente robusta, sugerindo que 99% da variância em LE + H pode ser explicada por Rn – G, tanto sob condições de céu claro quanto sob condições de presença de aerossóis.

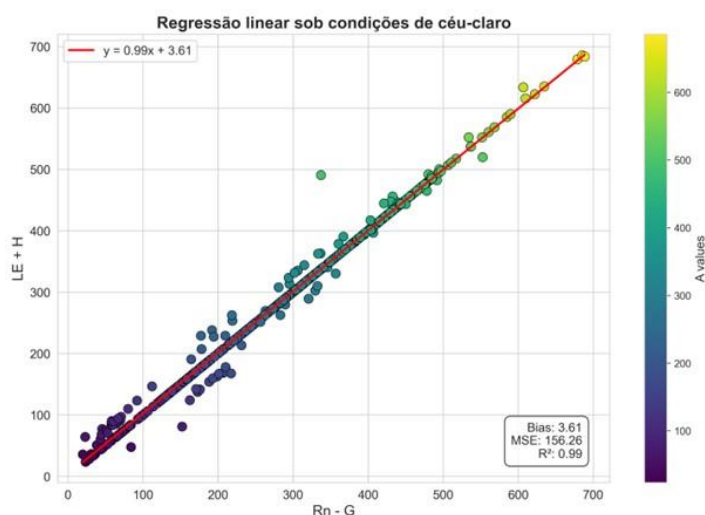


Figura 9. Análise de regressão linear sob condições de céu-claro, mostrando a relação entre o fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível (LE + H) no eixo x e a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo (Rn-G) no eixo y.

O viés de 3,61, evidenciado na Figura 9, e de 4,21, conforme apresentado na Figura 10, sugerem uma ligeira superestimação dos valores de $LE + H$. O Erro Quadrático Médio (MSE) de 156,26, observado na Figura 10, denota um erro médio quadrático relativamente baixo, o que

corroborar a precisão do modelo sob condições de céu claro. Por outro lado, o MSE de 246,59, que é superior ao encontrado sob condições de céu-claro (Figura 9), indica uma maior variabilidade nos dados sob condições de presença de aerossóis.

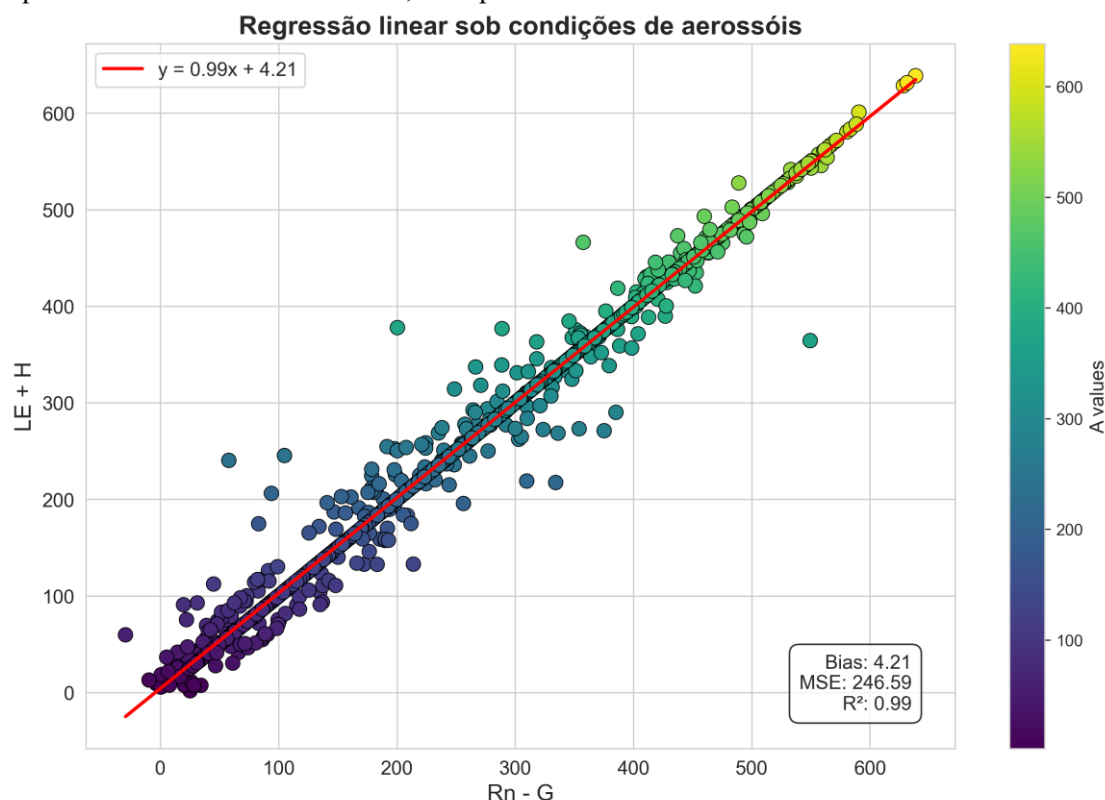


Figura 10. Análise de regressão linear sob condições de aerossóis, mostrando a relação entre o fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível ($LE + H$) no eixo x e a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo ($Rn - G$) no eixo y.

Conclusão

A análise detalhada das variáveis em intervalos horários revelou que valores de profundidade óptica acima de 0,071 estão associadas a alterações no balanço de energia. Detectou-se uma tendência de diminuição no saldo de radiação (Rn), sugerindo um impacto negativo na disponibilidade de energia para as componentes do balanço de radiação.

Em relação aos fluxos estimados pelo método de Bowen, observou-se um comportamento opostos entre o fluxo de calor latente (LE) e o fluxo de calor sensível (H). Sob condições de aerossóis, o LE demonstrou valores maiores, enquanto o H e o fluxo de calor no solo (G) apresentaram valores menores, indicando uma redistribuição da energia disponível quando comparados às condições de

céu-claro. Os maiores valores diários da radiação solar global ocorreram em janeiro entre as 11 e 13h local.

Foram encontradas diferenças negativas variando entre 3,89 e 15,64 Wm^{-2} para o Rn e de 9,00 a 28,13 Wm^{-2} para o H . Por outro lado, tanto o fluxo de calor latente (LE) quanto o fluxo de calor no solo (G) registraram valores significativamente maiores quando comparados às estimativas sob condições de céu-claro. Também foram observadas diferenças variando de 1,36 a 31,71 Wm^{-2} para o LE e de 20,62 a 133,23 Wm^{-2} para o G . Considerado todo o período, sob condições de aerossóis, o saldo de radiação (Rn), o fluxo de calor latente (LE), o fluxo de calor sensível (H) e a radiação global (Rg) apresentaram valores menores em comparação com os valores registrados sob

condições de céu-claro. Enquanto isso, o fluxo de calor no solo (G) e o índice de claridade (kt) apresentaram maiores valores, com diferenças de 43,85 % e 6,86 %, respectivamente.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Doutorado, ao Programa de Pós-graduação em Física Ambiental (PPGFA/UFMT) e à Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Este artigo é parte da tese de Doutorado do primeiro autor.

Referências

- Andreae, M.O., 2019. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning an updated assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 8523-8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>.
- Artaxo, P., Hansson, H.C., Machado, L.A.T., Rizzo, L.V., 2022. Tropical forests are crucial in regulating the climate on earth. *PLOS Climate* 1, e0000054. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>.
- Artaxo, P., Rizzo, L.V., Brito, J.F., Barbosa, H.M., Arana, A., Sena, E.T., Cirino, G.G., Bastos, W., Martin, S.T., Andreae, M.O., 2013. Atmospheric aerosols in amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday discussions* 165, 203-235. <https://doi.org/10.1039/C3FD00052D>.
- Bai, Y., Wang, J., Zhang, B., Zhang, Z., Liang, J., 2012. Comparing the impact of cloudiness on carbon dioxide exchange in a grassland and a maize cropland in northwestern China. *Ecological Research* 27, 615-623. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-0930-z>.
- Blanco, L. De S., Portella, D.A.P.Da C., Santos, J. L.A., Barbosa, S.C.O., Dias, J.L.R., 2022. O projeto de modernização brasileira e suas consequências socioambientais no matopiba. *Boletim Paulista de Geografia* 1, 121-136. <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/2162>.
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Bernsten, T., Deangelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D. et al., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of geophysical research: Atmospheres* 118, 5380-5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>.
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S.K., Sherwood, S., Stevens, B., Zhang, X.Y., 2013. Clouds And Aerosols. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013. 571-657.
- Bowen, I.S., 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical review* 27, 779. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.27.779>.
- Cirino, G., Souza, R., Adams, D., Artaxo, P., 2014. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the amazon. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 6523-6543. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6523-2014>.
- Curado, L.F.A., de Paulo, S.R., da Silva, H.J.A. et al., 2024. Effect of biomass burning emission on carbon assimilation over Brazilian Pantanal. *Theoretical and Applied Climatology* 155, 999–1006. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04673-0>.
- Curado, L.F.A., Paulo, S.R., Paulo, I.J.C., Maionchi, D.O., Silva, H.J.A., Costa, R.O., Silva, I.M.C.B., Marques, J.B., Lima, A.M.S., Rodrigues, T.R., 2023. Trends and patterns of daily maximum, minimum and mean temperature in brazil from 2000 to 2020. *Climate* 11, 168. <https://doi.org/10.3390/cli11080168>.
- Feingold, G., Jiang, H., Harrington, J.Y., 2005. On smoke suppression of clouds in amazonia. *Geophysical research letters* 32, GL021369. <https://doi.org/10.1029/2004GL021369>.
- Foley, J.A., Costa, M.H., Delire, C., Ramankutty, N., Snyder, P., 2003. Green surprise? how terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1, 3844. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0038:GSHTEC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0038:GSHTEC]2.0.CO;2).
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G. et al., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,

- Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2007.
- Franco, M.A., Morais, F.G., Rizzo, L.V. et al., 2024. Correction: Aerosol optical depth and water vapor variability assessed through autocorrelation analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics* 136, 22. <https://doi.org/10.1007/s00703-024-01019-x>.
- Gubanov, D.P., Vinogradova, A.A., Sadovskaya, N.V., 2023. Brochosomes and other bioaerosols in the surface layer of the atmosphere of moscow metropolis. *Atmosphere* 14, 504. <https://doi.org/10.3390/atmos14030504>.
- Hofmann, G.S., Cardoso, M.F., Alves, R.J., Weber, E.J., Barbosa, A.A., Toledo, P.M., Pontual, F.B., Salles, L.D.O., Hasenack, H., Cordeiro, J. L. et al., 2021. The brazilian cerrado is becoming hotter and drier. *Global Change Biology* 27, 4060-4073. <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I.A., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y., Nakajima, T. et al., 1998. Aeronet a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment* 66, 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5).
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Koeppen, W., Pérez, P.R.H., 1948. *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. [S.l.: s.n.].
- Leitão, M., Moura, M., Saldanha, T. F., Espínola Sobrinho, J., Oliveira, G.M., 2020. Balanço de radiação sobre um solo descoberto para quatro períodos do ano. *Revista de Ciência e Tecnologia da UNIMEP* 8, 59-65.
- Mallet, M., Tulet, P., Serça, D., Solmon, F., Dubovik, O., Pelon, J., Pont, V., Thouaron, O., 2009. Impact of dust aerosols on the radiative budget, surface heat fluxes, heating rate profiles and convective activity over west africa during march 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 7143-7160, 2009. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7143-2009>.
- Morais, F.G., Franco, M.A., Palácios, R., Machado, L.A., Rizzo, L.V., Barbosa, H.M., Jorge, F., Schafer, J.S., Holben, B.N., Landulfo, E. et al., 2022. Relationship between land use and spatial variability of atmospheric brown carbon and black carbon aerosols in amazonia. *Atmosphere* 13, 1328. <https://doi.org/10.3390/atmos13081328>.
- Murthy, B., Latha, R., Kumar, M., Mahanti, N., 2014. Effect of aerosol on evapo-transpiration. *Atmospheric Environment* 89, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.02>.
- Nabat, P., Kanji, Z. A., Mallet, M., Denjean, C., Solmon, F., 2022. Aerosol-cloud interactions and impact on regional climate. In: *Atmospheric Chemistry in the Mediterranean Region 2*, 403-425. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82385-6_20.
- Novais, J.W.Z., Sanches, L., Silva, L.B.D., Machado, N.G., Aquino, A.M., Junior, O.B.P., 2016. Albedo do solo abaixo do dossel em área de *Vochysia divergens* pohl no norte do pantanal. *Revista Brasileira de Meteorologia* 31, 157-166. <https://doi.org/10.1590/0102-778631220150001>.
- Palácios, R., Castagna, D., Barbosa, L., Souza, A.P., Imbiriba, B., Zolin, C.A., Nassarden, D., Duarte, L., Morais, F.G., Franco, M.A. et al., 2024. ENSO effects on the relationship between aerosols and evapotranspiration in the south of the Amazon biome. *Environmental Research* 250, 118516. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118516>.
- Palácios, R., Nassarden, D.C.S., Franco, M.A., Morais, F.G., Machado, L.A.T., Rizzo, L.V., Cirino, G., Pereira, A.G.C., Ribeiro, P.d.S., Barros, L.R.C., et al., 2022c. Evaluation of MODIS Dark Target AOD Product with 3 and 10 km Resolution in Amazonia. *Atmosphere* 13, 1742. <https://doi.org/10.3390/atmos13111742>.
- Palácios, R., Romera, K., Rizzo, L., Cirino, G., Adams, D., Imbiriba, B., Nassarden, D., Rothmund, L., Siqueira, A., Basso, J. et al., 2022b. *Atmospheric Pollution Research* 13, 101413. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101413>.
- Palácios, R.S., Artaxo, P., Cirino, G.G., Nakale, V., Morais, F.G., Rothmund, L.D., Biudes, M.S.,

- Machado, N.G., Curado, L.F.A., Marques, J.B., Nogueira, J., 2022a. Long-term measurements of aerosol optical properties and radiative forcing (2011-2017) over Central Amazonia. *Atmosfera* 35, 143-163. <https://doi.org/10.20937/ATM.52892>.
- Palácios, R.S., Romera, K.S., Curado, L.F.A., Banga, N.M., Rothmund, L.D., Sallo, F.S., Morais, D., Santos, A.C.A., Moraes, T.J., Morais, F.G. et al., 2020. Long term analysis of optical and radiative properties of aerosols in the amazon basin. *Aerosol and Air Quality Research* 20, 139-154. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0189>.
- Palácios, R.S., Sallo, F.S., Nogueira, J.S., 2016. Variability of aerosol optical depth over cerrado of mato grosso, brazil. *Environment and Ecology Research* 4, 99-105.
- Palácios, R.S.; de Paulo, S.R.; de Paulo, I.J.C.; Lobo, F.d.A.; Maionchi, D.d.O.; da Silva, H.J.A.; da Silva, I.M.C.B.; Marques, J.B.; Biudes, M.S.; Dalmagro, H.J.; et al., 2023. Temporal Evolution of Vapor Pressure Deficit Observed in Six Locations of Different Brazilian Ecosystems and Its Relationship with Micrometeorological Variables. *Forests* 14, 1543. <https://doi.org/10.3390/f14081543>.
- Perez, P., Castellvi, F., Ibanez, M., Rosell, J., 1999. Assessment of reliability of bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 97, 141-150. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5).
- Rodrigues, S., Cirino, G., Moreira, D., Pozzer, A., Palácios, R., Lee, S.C., Imbiriba, B., Nogueira, J., Vitorino, M.I., Vourlitis, G., 2023. Enhanced net CO₂ exchange of a semideciduous forest in the southern Amazon due to diffuse radiation from biomass burning. *Biogeosciences*, 21, 843-868, <https://doi.org/10.5194/bg-21-843-2024>.
- Rodrigues, T.R., Vourlitis, G.L., Lobo, F.D.A., Oliveira, R.G., Nogueira, J.D.S., 2014. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south central mato grosso, Brazil. *Journal of Geophysical Research* 119, 1-13. <https://doi.org/10.1002/2013JG002472>.
- Romera, K.S., Musis, C.R.D., Palácios, R.S., Curado, L.F.A., Nogueira, J.S., Marques, J.B., Costa, R.O., Brunelli, T.C., Duarte, L.G., 2019. Variabilidade interanual das propriedades óticas de aerossóis em biomas distintos na Amazônia legal. *Revista Brasileira de Climatologia* 25, 424-443. <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.61621>.
- Sabino, M., Silva, J.B.D., Costa, R.D.O., Duarte, L.G., Souza, A.P., 2022. Parâmetros biofísicos e índices de extremos de temperatura do ar na transição cerrado-amazônia. *Sociedade & Natureza*, 32, 490-500. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-49257>.
- Schafer, J., Eck, T., Holben, B., Artaxo, P., Duarte, A., 2008. Characterization of the optical properties of atmospheric aerosols in amazonia from long-term aeronet monitoring (1993-1995 and 1999-2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113, D4. <https://doi.org/10.1029/2007JD009319>.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2016. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. <https://doi.org/10.1080/00139157.1999.10544295>.
- Sena, E.T., Artaxo, P., Correia, A.L., 2013. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosols and the effects of land use change in amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 1261-1275. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1261-2013>.
- Steiner, A.L., Mermelstein, D., Cheng, S.J., Twine, T.E., Oliphant, A., 2013. Observed impact of atmospheric aerosols on the surface energy budget. *Earth Interactions* 17, 1-22. <https://doi.org/10.1175/2013EI000523.1>.
- Verma, S.B., Rosenberg, N.J., Blad, B.L., 1978. Turbulent Exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. *Journal of Applied Meteorology* (1962-1982), 330-338.
- Zhang, Li, L., Song, J., Akhter, Z.H., Zhang, J., 2023. Understanding aerosol-climate-ecosystem interactions and the implications for terrestrial carbon sink using the Community Earth System Model. *Agricultural and Forest Meteorology* 340, 109625. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109625>.
- Zhang, M., Yu, G.R., Zhang, L.M., Sun, X.M., Wen, X.F., Han, S.J., Yan, J.H., 2010. Impact of cloudiness on net ecosystem exchange of carbon dioxide in different types of forest ecosystems in China. *Biogeosciences* 7, 711-722. <https://doi.org/10.5194/bg-7-711-2010>.

Zhou, H., Yue, X., Lei, Y., Chenguang Tian, C., Yimian Ma, Y., Cao, Y., 2021. Aerosol radiative and climatic effects on ecosystem productivity and evapotranspiration. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 19, 100218.

<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.10.006>.

Zhou, H., Yue, X., Lei, Y., Tian, C., Ma, Y., Cao

Y., 2022. Large contributions of diffuse radiation to global gross primary productivity during 1981-2015. *Global Biogeochemical Cycles* 35, e2021GB006957. <https://doi.org/10.1029/2021GB006957>.