



## Influência das emissões carbonáceas de queimadas sobre o forçamento radiativo no Pantanal brasileiro

Danielle Christine Stenner NASSARDEN <sup>1</sup>, Leilane Gomes DUARTE <sup>1</sup>,  
Kelly Sousa Romera RAYMUNDO <sup>1</sup>, Leone Francisco Amorim CURADO <sup>1</sup>,  
João Basso MARQUES <sup>1</sup>, Rafael da Silva PALÁCIOS <sup>\*1,2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

\*E-mail: [rafael.pgfa@gmail.com](mailto:rafael.pgfa@gmail.com)

Submetido em: 13/12/2024; Aceito em: 11/02/2025; Publicado em: 05/03/2025.

**RESUMO:** Os aerossóis atmosféricos têm um impacto significativo no clima da Terra, afetando a quantidade de radiação solar que atinge a sua superfície e impactando diretamente no aquecimento global. Uma grande incerteza relativa aos impactos dos aerossóis no clima está relacionada ao Brown Carbon (BrC), um constituinte orgânico emitido como resultado da combustão incompleta da biomassa que absorve luz. Este estudo teve como objetivo definir e quantificar as absorções de Black Carbon (BC) e Brown Carbon (BrC) utilizando medições *in-situ* de uma campanha realizada no Pantanal Mato-grossense entre 2017-2019. Os modelos foram ajustados para calcular a Forçante Radiativa (FR). Ao examinar as perturbações de FR causadas por esses dois componentes, foi possível determinar as perturbações do equilíbrio radiativo tanto no nível da camada atmosférica superior (topo) quanto na superfície. Este estudo apresentou descobertas inovadoras que podem ajudar a melhorar a compreensão do balanço energético na região do Pantanal, ao mesmo tempo que permitem estimativas mais precisas da contribuição dos aerossóis para os modelos de mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** aerossóis; Brown Carbon (BrC); Black Carbon (BC); forçante radiativa (FR).

## Influence of carbonaceous emissions from forest fires on radiative forcing in the Brazilian Pantanal

**ABSTRACT:** Aerosols significantly impact the Earth's climate, affecting the amount of solar radiation that reaches its surface and directly impacting global warming. A large uncertainty regarding the impacts of aerosols on climate is related to Brown Carbon (BrC), an organic constituent emitted due to the incomplete combustion of light-absorbing biomass. This study aimed to define and quantify Black Carbon (BC) and Brown Carbon (BrC) absorptions using *in-situ* measurements from a campaign carried out in the Pantanal Mato Grosso between 2017 and 2019. The models were adjusted to calculate the Radiative Forcing (RF). By examining the RF perturbations caused by these two components, it was possible to determine the radiative balance perturbations at the upper atmospheric layer (top) and the surface. This study presented innovative findings that may help improve the understanding of the energy balance in the Pantanal region while allowing more accurate estimates of the contribution of aerosols to climate change models.

**Keywords:** aerosols; Brown Carbon (BrC); Black Carbon (BC); radiative forcing (RF).

### 1. INTRODUÇÃO

O carbono é o elemento mais abundante na composição dos aerossóis e desempenha papel indispensável na atmosfera devido às suas propriedades de absorção e espalhamento da radiação. Nos estudos de aerossóis atmosféricos, aqueles constituídos principalmente por carbono são chamados de aerossóis carbonáceos. Dois componentes se destacam pelas suas características absorvedoras: *Black Carbon* (BC) e *Brown Carbon* (BrC). O BC consiste em partículas emitidas diretamente na atmosfera durante processos de combustão incompleta, como queima de biomassa, combustíveis fósseis ou atividades, caracterizando-se por sua significativa capacidade de absorção de radiação visível e infravermelho próximo (BOND et al., 2013), o que tem despertado o interesse em

estudos de transferência radiativa atmosférica (RIZZO et al., 2011; SENA et al., 2013; PALÁCIOS et al., 2020). Isso acontece porque nenhuma outra substância presente na atmosfera em quantidades significativas absorve a radiação por unidade de massa de maneira tão eficiente (BOND; BERGSTROM, 2006). Outro fator contribuinte está relacionado aos baixos níveis de reatividade química enquanto estão em suspensão na atmosfera, ou seja, só podem ser removidos da atmosfera por remoção úmida ou deposição seca na superfície (BOND et al., 2013).

Partículas na atmosfera que absorvem radiação, mas não são BC, são conhecidas como Brown Carbon (BrC) devido à sua cor marrom. O BrC é composto por partículas de carbono orgânico (OC) e pode ser formado por aerossóis

orgânicos secundários (SOA) produzidos na atmosfera devido à reatividade química. Sua origem está relacionada à queima lenta e incompleta de hidrocarbonetos, como biomassa, e à oxidação de materiais biogênicos pela radiação solar. Devido à sua capacidade de absorver luz ultravioleta, o BrC tem despertado interesse na comunidade científica como uma possível influência nas mudanças climáticas (FENG et al., 2013). Como destacado por Kirchstetter et al. (2004), o BrC é uma importante fonte de absorção de luz nas regiões ultravioleta e visível do espectro, especialmente em áreas urbanas e rurais próximas a fontes de emissão de biomassa e combustíveis fósseis. De acordo com Chen; Bond (2010), a capacidade de absorção de luz pelo carbono orgânico proveniente da combustão de madeira pode ser comparável à absorção do BC em algumas circunstâncias.

O impacto dos aerossóis no clima ainda é uma das maiores fontes de incertezas na avaliação das mudanças climáticas. No balanço climático global, a forçante radiativa líquida dos aerossóis é negativa, o que contribui para o resfriamento. No entanto, certos componentes de aerossóis carbonáceos apresentam valores positivos, absorvendo a radiação e aquecendo a atmosfera. O relatório do IPCC, o AR6 (IPCC, 2021), destaca que o BC é um dos principais contribuintes para o aquecimento global, pois ele absorve a radiação solar e aquece tanto a atmosfera quanto a superfície terrestre. Isso indica que o BC é responsável por um aquecimento adicional na atmosfera e na superfície da Terra de aproximadamente 0,25 W m<sup>-2</sup> (IPCC, 2021). O relatório também destaca o BC como o segundo maior contribuinte para a forçante radiativa antropogênica, logo após o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sendo responsável por cerca de 30% da forçante radiativa total causada pelas emissões de gases de efeito estufa e aerossóis. Para o BrC, a forçante radiativa foi estimada em cerca de +0,05 W m<sup>-2</sup>, no entanto, com uma incerteza considerável (IPCC, 2021). Essa incerteza decorre da dificuldade em medir a quantidade de BrC presente na atmosfera, uma vez que vários métodos são utilizados para sua determinação, e em compreender suas propriedades ópticas e sua interação com outros componentes de aerossóis.

Embora existam modelos globais para estimar a Forçante Radiativa Direta (DRF) e os Efeitos Radiativos Diretos (DREs) com aerossóis de BrC em diferentes locais, estudos indicam que é necessário compreender melhor as propriedades ópticas antes de aplicá-las em simulações climáticas globais e regionais. Vários estudos têm sido realizados na região Amazônica devido às condições favoráveis para quantificar os efeitos dos aerossóis, permitindo a caracterização das propriedades ópticas de espalhamento e absorção em ambientes com interferência antrópica e predominância natural. Isso possibilita investigar os mecanismos que influenciam a formação e evolução do BC e BrC. No entanto, outras regiões também podem servir como laboratórios naturais para estudar aerossóis devido às suas condições naturais, sendo o Pantanal o foco desta pesquisa.

Nesse contexto esse trabalho buscou um melhor entendimento da interação da radiação solar com partículas de aerossóis atmosféricos, especificamente BC e BrC, sobre o Pantanal Mato-grossense. O acompanhamento constante das propriedades ópticas dos aerossóis por um período de 3 anos permitiu identificar como esse material particulado interage com a radiação e calcular o impacto dos aerossóis no clima regional. Pesquisas anteriores sobre as características

ópticas dos aerossóis no Pantanal Mato-grossense indicaram flutuações sazonais na quantidade de BC nas partículas de moda fina e de moda grossa. Durante a estação seca, aproximadamente 90% do BC é encontrado na moda fina. Estas descobertas foram atribuídas às possíveis influências das queimadas de menor escala na área, bem como ao transporte de partículas provenientes de queimadas em outras regiões através das massas de ar. Os primeiros estudos se concentraram nas análises físico-químicas dos aerossóis e em suas propriedades ópticas, como a absorção de BC, o albedo de espalhamento simples (SSA) e o Angstrom de absorção. No entanto, ainda não foram realizados trabalhos que estimassem a contribuição do Brown Carbon (BrC) para a absorção, nem estimativas da forçante radiativa na área.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Pantanal Mato-grossense e as medidas *in-situ*

Esse estudo foi conduzido utilizando dados coletados ao longo de uma campanha, que ocorreu de janeiro de 2017 a dezembro de 2019 no Pantanal. O local da pesquisa fica dentro do Parque Baía das Pedras, parte da Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN SESC, nas coordenadas 16°39' S; 56°47' W, próximo às cidades de Poconé e Barão de Melgaço, a aproximadamente 160 km de Cuiabá, no Estado de Mato Grosso, Brasil. A vegetação nessa área é predominantemente composta por *Combretum lanceolatum* Pohl, com altura média do dossel em torno de 4 metros. Esta região é considerada uma das maiores planícies de sedimentação do mundo (FANTIN-CRUZ et al., 2011). O bioma apresenta um complexo mosaico de formas de relevo e diversificadas espécies vegetais, incluindo mais de mil tipos distintos (JUNK et al., 2014).

A região possui duas estações distintas: uma estação seca durante o outono e inverno (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro) e outra estação úmida durante a primavera e verão (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro). O índice pluviométrico varia bastante entre as estações, sendo o verão a estação mais chuvosa. No entanto, para este estudo, os períodos seco e chuvoso foram determinados com base nas mudanças nas propriedades ópticas dos aerossóis, seguindo um método descrito por Rizzo et al. (2013), com o período seco definido de julho a outubro e o período chuvoso de novembro a junho.

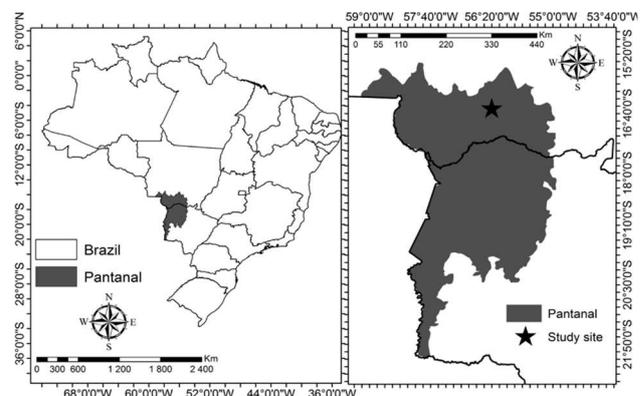


Figura 1. Localização da área de estudo presente na Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN SESC (16°39' S; 56°47' W). (Fonte: PALÁCIOS et al., 2022).

Figure 1. Location of the study area present in the Private Natural Heritage Reserve – RPPN SESC (16°39' S; 56°47' W). (Source: PALÁCIOS et al., 2022).

As medidas de concentração de BC foram realizadas utilizando um aetalômetro modelo AE42, modificado internamente para corresponder ao AE33 de 7 canais, com comprimentos de onda de 370, 470, 520, 590, 660, 880 e 950 nm. O BC é reconhecido por sua elevada capacidade de absorção de radiação. Devido a essa propriedade, é possível medir a atenuação ( $A_t$ ) de um feixe de luz transmitido através de um filtro de quartzo. Esse procedimento permite a coleta contínua de dados de aerossóis com uma resolução temporal variando de 1 a 5 minutos. A atenuação ótica ( $A_t$ ) é definida como:

$$A_t = 100 \ln \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (01)$$

em que:  $I_0$  é a intensidade da luz transmitida pela área do filtro limpo A, e  $I$  é a intensidade da luz transmitida pela área do filtro A após sua exposição. A atenuação ótica varia com o comprimento de onda da luz incidente ( $\lambda$ ), o que possibilita a determinação da concentração de BC para comprimentos de onda específicos:

$$A(t) = \delta_{ATN} [BC] \quad (02)$$

em que:  $\delta_{ATN}$  é a seção de choque de absorção ótica para o comprimento de onda  $\lambda$ , e  $[BC]$  representa a concentração de BC em  $\text{ng m}^{-3}$ . Nesse estudo também foram utilizadas medidas do coeficiente de espalhamento da radiação pelos aerossóis ( $\sigma_{scat}$ ). Essas medidas foram realizadas com um nefelômetro modelo Ecotech M9003, operando a um comprimento de onda de 525 nm, com uma resolução temporal de 5 minutos.

O aetalômetro e o nefelômetro foram instalados no interior da Base de Pesquisas Avançadas do Pantanal, onde a temperatura e a umidade relativa foram controladas e mantidas a 25°C através de ar-condicionado, além de um desumidificador de ar. Esses equipamentos foram conectados em paralelo a um inlet de seção de corte  $\text{PM}_{2,5}$ , com uma vazão total de 3  $\text{L min}^{-1}$ , sendo que 2  $\text{L min}^{-1}$  foram direcionados para o aetalômetro e 1  $\text{L min}^{-1}$  para o nefelômetro. O *inlet* foi posicionado a uma altura de 4,5 metros acima do solo. Para controlar a umidade do ar amostrado, sílica gel foi utilizada, com trocas semanais, assegurando que a umidade do ar permanecesse abaixo de 40%. Esse controle é crucial, pois a umidade pode aumentar o tamanho das partículas higroscópicas, afetando os processos de absorção e espalhamento. Nas medidas realizadas em *in-situ*, foram conduzidas análises exploratórias para identificar dados inconsistentes, como concentrações negativas. Também foi feita a ajuste e padronização dos coeficientes de dispersão do BC com base nas condições de pressão e temperatura registradas pelo nefelômetro. Após o processamento, os dados foram armazenados em arquivos contendo médias a cada 30 minutos. As medidas de absorção foram corrigidas com critérios locais de acordo com Palácios et al. (2022). Essas medidas foram utilizadas para separar as absorções de BC e BrC de acordo com o método de Wang et al. (2016) e utilizadas, juntamente com o coeficiente de espalhamento, para determinar a profundidade ótica do aerossol (AOD) no local de estudo.

## 2.2. Medidas da AERONET

Foram utilizadas medidas de sensoriamento remoto da AERONET (HOLBEN et al., 1998), uma rede global que monitora propriedades físicas e óticas dos aerossóis com

radiômetros instalados ao nível da superfície. Esses equipamentos são fotômetros espectrais automáticos distribuídos em todo o mundo, possibilitando o monitoramento quase instantâneo da espessura ótica dos aerossóis, coluna d'água precipitável, distribuição de tamanho das partículas, e outras propriedades. Os dados estão disponíveis online em <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.

Os radiômetros são sensores acoplados a colimadores de 33 cm de comprimento, projetados para rejeitar a luz difusa refletida pelas paredes. Eles são protegidos por uma janela de quartzo, permitindo observações precisas com um detector de silício enriquecido. Isso assegura uma relação sinal-ruído adequada para medidas espectrais precisas entre 300 e 1200 nm. O CIMEL 318A é um radiômetro solar que possui colimadores de 25 cm e uma base robótica de 40 cm. Esse sistema automatiza a coleta de dados ao direcionar os colimadores para o sol seguindo uma programação previamente estabelecida. Um microprocessador calcula a posição solar com base na hora, latitude e longitude, garantindo que os colimadores apontem para o sol com precisão. Após a coleta de dados, o instrumento retorna à sua posição de repouso, aproximadamente apontando para o nadir. Um sensor de umidade integrado ao sistema interrompe as medições em caso de precipitação. Os radiômetros podem medir tanto a radiação direta quanto a radiação solar difusa (PROCÓPIO, 2005).

Na análise das propriedades óticas dos aerossóis no Pantanal, os coeficientes de Angstrom de espalhamento da AERONET foram utilizados para corrigir os coeficientes de absorção medidos localmente. Embora as condições atmosféricas e as medições sejam distintas entre os instrumentos no Pantanal e a AERONET, essa abordagem permitiu uma caracterização inédita dessas propriedades. A distância geográfica entre as medições *in-situ* e as da AERONET, aproximadamente 100 km, foi considerada aceitável, assumindo que as propriedades óticas da coluna atmosférica são semelhantes nessa região (PALÁCIOS et al., 2022).

## 2.3. Estimativas de Brown Carbon (BrC) e Black Carbon (BC)

A obtenção das frações de absorção de BrC geralmente segue o método proposto por Lack e Langridge (2013), que se baseia na análise de pares de medidas cobrindo os extremos do espectro da luz visível (~400 a 800 nm). Nesse método, a absorção em comprimentos de onda mais longos é considerada principalmente devido ao Black Carbon (BC). Essa medida de absorção é então extrapolada para comprimentos de onda mais curtos usando o expoente de absorção de Angstrom ( $\alpha_{abs}$ ). A diferença entre essa estimativa atribuída ao BC e a absorção total em comprimentos de onda mais curtos é atribuída à absorção de uma componente chamada Brown Carbon (BrC). A contribuição de BrC tende a crescer à medida que o comprimento de onda diminui, podendo até predominar na absorção para comprimentos de onda abaixo de 450 nm. Enquanto isso, a contribuição de BC permanece relativamente constante em relação ao comprimento de onda. No entanto, as propriedades de absorção do BrC ainda são pouco compreendidas, evidenciando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre sua dependência espectral de absorção.

Recentemente, uma nova abordagem para determinar o Brown Carbon (BrC) foi desenvolvida por Wang et al. (2016),

introduzindo uma metodologia que considera a dependência das medidas de absorção em relação ao comprimento de onda. Este método incorpora uma variedade de propriedades de Black Carbon (BC) relevantes atmosféricamente, anteriormente desconsideradas. Ele se baseia em medidas de absorção em três comprimentos de onda: um no ultravioleta próximo ou em um comprimento de onda curto, que inclui a absorção do BrC, e dois comprimentos de onda visíveis, nos quais a absorção do BrC não está presente. Esse método já foi aplicado com sucesso em pesquisas na Amazônia, como os estudos de Morais et al. (2022), Ponczek et al. (2022) e Saturno et al. (2018). Para este trabalho, os coeficientes de absorção ( $\alpha_{abs}$ ) foram obtidos a partir de medidas realizadas pelo aetalômetro. Como esse método se baseia em medidas de absorção em vários comprimentos de onda com cálculos Mie teóricos para BC, o  $\alpha_{abs}$  do BC varia quando diferentes pares de comprimento de onda são utilizados como referência. O método caracteriza a Wavelength Dependent Absorption (WDA) (dependência do Angstrom de absorção com o comprimento de onda).

Podem-se perceber que assumir a independência do comprimento, ou seja, de  $\alpha_{abs} = 1$  para BC, resultaria em um WDA de zero. Os valores de absorção do BC podem ser determinados por:

$$BC\alpha_{abs470/880} = \alpha_{abs660/880} + WDA \quad (03)$$

De forma que a absorção por BrC pode ser expressa da seguinte maneira:

$$BrCAbs_{470} = Abs_{470} - BCabs_{470} \quad (04)$$

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Estimativas da Forçante Radiativa FR

Uma forma simples de definir a Forçante Radiativa dos aerossóis (FR) é a alteração de fluxos líquidos de radiação solar pelos processos de espalhamento e absorção da radiação pelos aerossóis (PALÁCIOS et al., 2022). Em termos gerais, os aerossóis atmosféricos contribuem para o resfriamento do sistema climático, contrabalançando o aquecimento causado pelos gases de efeito estufa. Com exceção do BC, as forçantes radiativas associadas aos aerossóis contribuem para um resfriamento global, quando combinadas. A FR reflete o impacto dos aerossóis com base na carga do aerossol. Os fluxos de radiação foram estimados instantaneamente para condições sem aerossóis e com aerossóis. A diferença nos fluxos causada pelos aerossóis permitiu a obtenção dos valores de forçante radiativa (FR) tanto na superfície quanto no topo da atmosfera. Esses valores instantâneos foram integrados para calcular a forçante radiativa ao longo de 24 horas. Devido à falta de medidas in-situ detalhadas, o estudo usou as estimativas da AERONET para FR na superfície (FR-sup) e no topo da atmosfera (FR-top) como entrada para determinar os valores de FR no Pantanal. Os resultados dos valores instantâneos e ao longo de 24 horas obtidos do produto de inversão da AERONET estão representados na Figura 2.

Foram utilizados os valores instantâneos e integrados em 24 horas de FR da AERONET (PALÁCIOS et al., 2022) para ajustar uma equação de FR em função dos valores de AOD em 500 nm, também fornecidos pela AERONET. Os ajustes lineares realizados resultaram nas Equações 5, 6, 7 e 8,

apresentadas na Tabela 1. Essas equações foram usadas para obter a FR para o Pantanal. Através das medições in-situ dos coeficientes de espalhamento e absorção feitas pelo nefelômetro e aetalômetro, respectivamente, foi possível determinar o coeficiente de extinção. Integrando o coeficiente de extinção ao longo da coluna atmosférica, obteve-se a AOD em 525nm e, conseqüentemente, estimou-se a FR para a área de estudo.

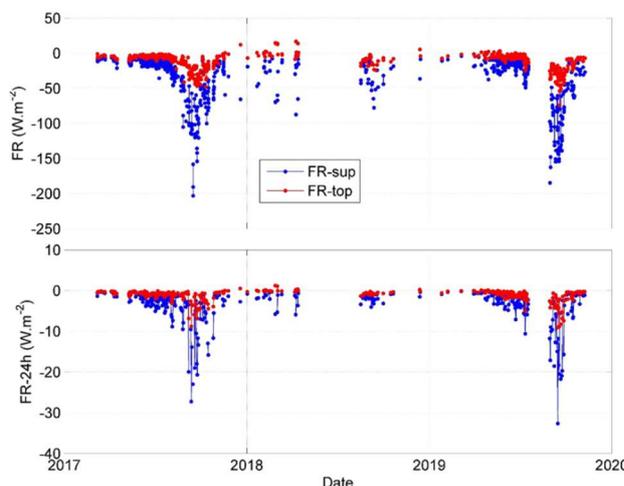


Figura 2. Estimativas fornecidas pela AERONET de FR, no quadro superior o valor instantâneo e no quadro inferior o FR 24 horas para superfície e topo da atmosfera nos períodos seco e chuvoso. Figure 2. Estimates provided by AERONET of FR, in the upper table the instantaneous value and in the lower table the 24-hour FR for the surface and top of the atmosphere in dry and rainy periods.

Tabela 1. Equações 17, 18, 19 e 20, obtidas pelo ajuste linear entre os valores de FR e AOD para o site da AERONET. Table 1. Equations 17, 18, 19 and 20, obtained by linear adjustment between the FR and AOD values for the AERONET website.

FR	Ajuste linear	RMSE	P-val	Eq.
Instantânea sup	$y = -135.20x - 4.07$	9.45	< 0.001	5
Instantânea top	$y = -40.07x - 1.85$	4.23	< 0.001	6
24h sup	$y = -15.92x - 4.51$	3.18	< 0.001	7
24h top	$y = -4.84x - 0.20$	1.07	< 0.001	8

Os resultados obtidos por esses ajustes lineares foram comparados com as estimativas de Procópio et al. (2004) para sítios na Amazônia. A Figura 3 apresenta a comparação dos valores de FR-24h estimados pelo modelo proposto por Procópio et al. (2004) o modelo ajustado utilizado nesta pesquisa e os dados obtidos através da AERONET.

Para obter os valores de FR associados às contribuições de BC e BrC, foi realizado um ajuste de curva entre as estimativas de FR instantâneo para a superfície e para o topo da atmosfera obtidas pela AERONET, levando em consideração as contribuições de absorção. Essas estimativas foram combinadas com os valores de Absorção Óptica na Atmosfera (AOD) em 440 nm e 870 nm também obtidos pela AERONET por meio dos produtos de inversão. Os valores de FR da AERONET para o topo da atmosfera foram selecionados apenas para valores positivos, a fim de avaliar as contribuições de BrC e BC no forçamento radiativo positivo. Já para a superfície, foi utilizado o conjunto total de FR instantâneos. Os ajustes lineares e parâmetros estatísticos obtidos com as medidas da AERONET são apresentados na Figura 4 e Tabela 2.

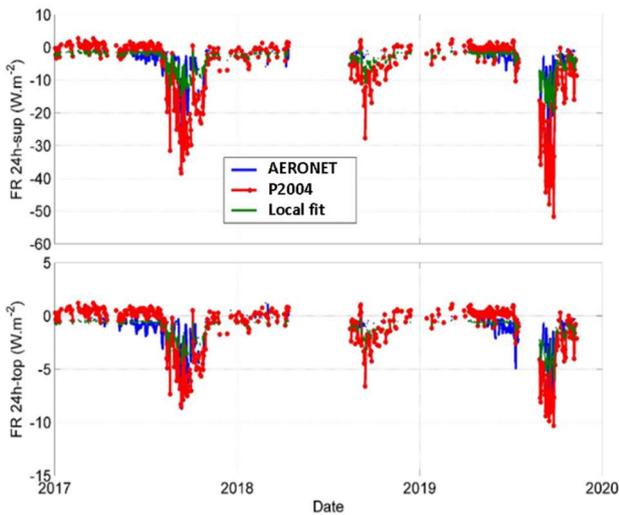


Figura 3. FR 24h estimadas pelo modelo proposto por Procópio et al., 2004 (P2004), pelo modelo ajustado para o local e pelos valores da AERONET.  
 Figure 3. 24h FR estimated by the model proposed by Procópio et al., 2004 (P2004), by the model adjusted for the location and by the AERONET values.

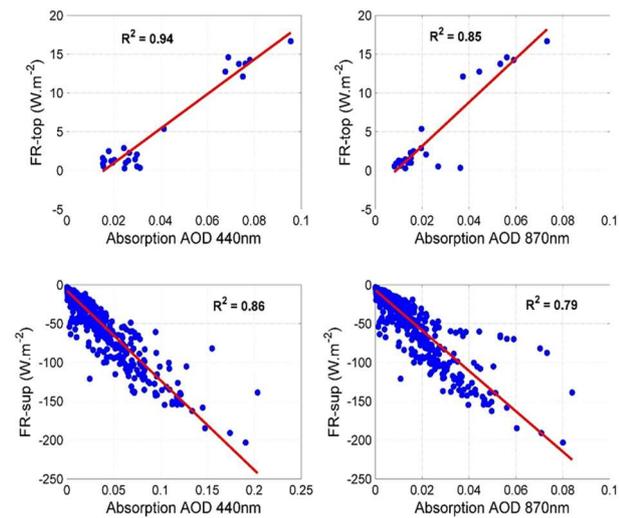


Figura 4. Ajustes lineares entre os valores instantâneos de FR com os valores de AOD de absorção em 440 e 870 nm da AERONET. Para FR-top foram utilizados apenas os pares para FR positiva.  
 Figure 4. Linear fits between the instantaneous FR values with the absorption AOD values at 440 and 870 nm from AERONET. For FR-top, only the pairs for positive FR were used.

Tabela 2. Equações 9, 10, 11 e 12, obtidas pelos ajustes entre os valores de FR e AOD de absorção, em 440 e 870 nm da AERONET, da Figura 4.

Table 2. Equations 9, 10, 11 and 12, obtained by fitting the FR and AOD absorption values at 440 and 870 nm from AERONET, in Figure 4.

FR	Ajuste	RMSE	P-val	Eq.
FR-top BrC	$y = 222.8x - 3.5$	1.44	< 0.001	9
FR-top BC	$y = 282.3x - 2.5$	2.22	< 0.001	10
FR-sup BrC	$y = -1156x - 7.4$	12.44	< 0.001	11
FR-sup BC	$y = -2602x - 6.8$	15.14	< 0.001	12

Nos anos 2005, 2007 e 2010 notou-se um acréscimo significativo no AOD, destacando o ano de 2007 com o elevado foco de queimadas na região de floresta, Cerrado e Pantanal (INPE, 2020). Acarretando inclusive a interrupção de pouso, por algumas horas, devido à baixa visibilidade no Aeroporto Internacional Marechal Rondon, localizado na cidade de Várzea Grande, Mato Grosso.

### 3.2. Variações de FR no Pantanal

A Figura 5 mostra uma série temporal de 2017 a 2019 das medidas integradas de Profundidade Óptica Atmosférica (AOD) em 525 nm na área de estudo, juntamente com os produtos correspondentes de AOD direta e inversa fornecidos pela rede AERONET em 500 e 440 nm, respectivamente. A série temporal de AOD em 525 nm exibe uma marcada variação sazonal, refletindo a flutuação das emissões de aerossóis entre os períodos de seca e chuva no Pantanal. Durante o período chuvoso, foram observados valores menores de AOD, com uma média de  $0,04 \pm 0,06$  que é atribuído principalmente à deposição úmida, embora também possa estar relacionado à natureza das fontes de aerossóis, que incluem tanto emissões naturais quanto algumas emissões locais. Em um estudo anterior, Moraes et al. (2022) identificaram uma média de  $0,10 \pm 0,09$  em AOD 500 nm durante o período chuvoso em Cuiabá. Embora essa diferença não seja estatisticamente significativa, os valores mais elevados de AOD em Cuiabá sugere que as emissões urbanas superam as emissões naturais, mesmo durante o período chuvoso. Portanto, as emissões naturais da região e os processos de processamento de aerossóis atmosféricos desempenham um papel crucial na carga e nas propriedades ópticas dos aerossóis.

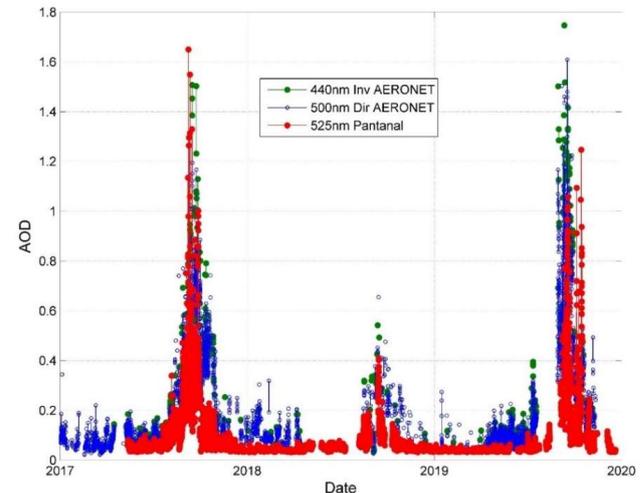


Figura 5. FR 24h estimadas pelo modelo proposto por Procópio et al., 2004 (P2004), pelo modelo ajustado para o local e pelos valores da AERONET.

Figure 5. 24h FR estimated by the model proposed by Procópio et al., 2004 (P2004), by the model adjusted for the location and by the AERONET values.

Foi observado um aumento substancial na (AOD) média durante o período seco, chegando a cerca de  $0,14 \pm 0,13$  para o Pantanal, o que se deve principalmente às emissões regionais de queima de biomassa. Em seu estudo, Procópio et al. (2004) destacam que as características da AOD estão diretamente relacionadas aos focos de queimadas, que aumentam e se intensificam nos meses de agosto e setembro em toda a região central do Brasil, devido ao regime de seca

na região. Outro estudo, realizado por Palácios et al. (2015), indicou que a AOD influencia as variações do fluxo de radiação sobre a superfície, pelo menos durante o período de seca. A diminuição no fluxo de radiação está diretamente associada à queima de biomassa, que gera grandes quantidades de Black Carbon (BC), um forte absorvedor de radiação, como mencionado por Artaxo et al. (2013). No entanto, também é importante considerar o efeito de dispersão da luz, que é predominante nas partículas de fumaça (PROCÓPIO et al., 2004).

Com base nos valores integrados de AOD 525 nm no Pantanal, foi possível estimar FR diária na superfície e no topo da atmosfera. Os valores diários estão representados na Figura 6. Assim como a AOD, a FR dos aerossóis no topo e na superfície da atmosfera também apresenta grandes variações sazonais, especialmente durante o período seco, quando ocorre a intensificação das queimadas. Em estudos realizados na Amazônia, Sena et al. (2013) atribuiu essa variabilidade às “diferenças na concentração e localização das fontes de aerossóis e à dinâmica de transporte das plumas de fumaça”. Observa-se que a FR líquida é predominante negativa tanto na superfície como do topo da atmosfera, entretanto as maiores magnitudes são encontradas na superfície. Os maiores valores de FR são observados durante o período de seca. Durante os três anos analisados, a média da FR direta na superfície e no topo da atmosfera durante o período de seca foi de  $-6,81$  e  $-0,90$   $W m^{-2}$ , respectivamente.

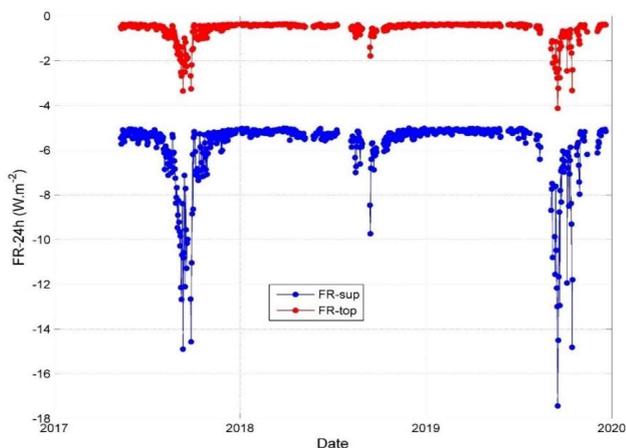


Figura 6. FR 24h estimadas pelo modelo proposto por Procópio et al., 2004 (P2004), pelo modelo ajustado para o local e pelos valores da AERONET.

Figure 6. 24h FR estimated by the model proposed by Procópio et al., 2004 (P2004), by the model adjusted for the location and by the AERONET values.

A FR medida no topo da atmosfera apresentou médias de  $-0,89 \pm 0,66$  e  $-0,42 \pm 0,05$   $W m^{-2}$  para os períodos seco e chuvoso, respectivamente. Por outro lado, as médias de FR para a superfície foram calculadas como  $-6,80 \pm 2,17$  e  $-5,23 \pm 0,17$   $W m^{-2}$  para períodos secos e chuvosos, respectivamente. Em comparação com outras regiões como Manaus - site da Embrapa, onde Palácios et al. (2020) observou valores de  $-9, 0,17$  e  $-17,10$   $W m^{-2}$  para cada respectivo período, esses resultados são inferiores aos encontrados nesta área de estudo. Uma possível explicação é que existe um baixo nível de concentração de partículas de aerossol nesta região, o que poderia explicar porque os valores absolutos obtidos na medição de FR podem ser

comparativamente menores nas superfícies das áreas aqui estudadas.

Em relação aos valores de FR, Procópio et al. (2004) estimou variações de  $-26$  a  $-62$   $W m^{-2}$  sobre a superfície em uma região de transição entre a Amazônia e o cerrado. Enquanto isso, Palácios et al. (2015) estimaram valores variando de  $10$  a  $-63$   $W m^{-2}$  para a região de transição pantanal-cerrado. Neste estudo, os valores de FR obtidos variaram de  $-5$  a  $-17$   $W m^{-2}$  na superfície. Apesar de estarem localizados próximos, Palácios et al. (2015) analisaram FR de julho a setembro de 2012, enquanto este estudo analisou dados abrangendo três anos (de 2017 a 2019). Isto poderia explicar por que existem diferenças entre as diversas variações de FR observadas nessas regiões. A região de estudo é influenciada pela sazonalidade dos padrões meteorológicos, tendo como agravante as elevadas ocorrências de incêndios florestais no Brasil central, principalmente entre agosto e setembro (PALÁCIOS et al., 2014). Segundo Santos et al. (2016), durante os períodos de seca, as fontes primárias de emissão de aerossóis são as emissões biogênicas, o levantamento de partículas de poeira do solo e a queima de biomassa, esta última com influência predominante. Durante um período seco, altas concentrações de aerossóis de queimadas podem levar a um efeito de resfriamento no clima, resultando em valores de FR mais negativos do que durante os períodos chuvosos. Apesar dos níveis elevados de Black Carbon (BC) durante esses períodos, as partículas dispersas dominam devido às altas concentrações de orgânicos.

#### 4. DISCUSSÃO

A variação sazonal da absorção total, que inclui BC e BrC, assim como somente BC, é notória ao longo dos três anos estudados, sendo influenciada principalmente pelo transporte resultante da queima de biomassa. Os dados revelam que durante o período seco, a presença de BC é substancialmente maior em comparação com BrC. Por outro lado, a oscilação sazonal do BrC não é tão perceptível nos anos de 2017 e 2018 quando comparada ao BC. As maiores médias sazonais de BC e BrC foram observadas durante o período seco de 2019. Ao analisar os dados de queimadas na região fornecidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), constatou-se que, entre os três anos estudados, 2019 foi aquele que registrou o maior número de queimadas. A média da fração de absorção por BrC foi cerca de 16% ao longo de todo o período, enquanto nos períodos seco e chuvoso foi de 9% e 24%, respectivamente. Isso indica a importância do BrC na composição dos aerossóis no Pantanal mato-grossense.

Conforme observado na Figura 7, o BrC apresentou uma variação anual mínima, com os meses de seca mostrando uma ligeira elevação na variação. Por outro lado, em relação ao BC, houve uma variação significativa durante o período seco, com um pico em setembro. As médias de absorção de BC foram de  $1,37 \pm 2,03$  e  $0,41 \pm 0,48$   $Mm^{-1}$  para os períodos seco e chuvoso, respectivamente, enquanto para o BrC foram de  $0,28 \pm 0,37$  e  $0,15 \pm 0,10$   $Mm^{-1}$  para os mesmos períodos. A fração de BrC representou aproximadamente 10% e 24% da absorção total durante os períodos seco e chuvoso em 470 nm, respectivamente. Ponczek et al., (2022) demonstraram que em Rio Branco, a fração de BrC representou aproximadamente 20% da absorção total a 470 nm, enquanto em ATTO, Saturno et al., (2018) mostraram que essa fração foi de cerca de 24% a 370 nm.

As médias sazonais da FR devido à BC e BrC para superfície e topo atmosférico em cada período são apresentadas na Tabela 3. Do ponto de vista estatístico, embora BC apresente valores superiores durante os períodos seco e chuvoso no topo atmosférico, bem como durante a estação seca na superfície, sua média não difere do BrC. De acordo com o estudo de Ramanathan and Carmichael (2008), uma vez que as partículas de BrC podem exercer um forçamento radiativo significativo, sugere-se que um forçamento radiativo por elas possa ser adicionado às emissões de Carbono Negro (BC) em algumas regiões, especialmente nas camadas mais baixas da atmosfera onde a radiação interage mais com partículas de aerossol (BOND et al., 2013).

No topo da atmosfera, destaca-se uma fração de BC com maiores valores positivos ao longo de todo o período de estudo. Essa diferença pode ser explicada pelo entendimento de que BC e BrC ocorrem em regiões diferentes do espectro. Depois de interagir com partículas e gases na atmosfera, a radiação emitida de volta ao espaço tem comprimentos de onda mais longos que são absorvidos pelo BC. Como o BrC absorve radiação em bandas menores dentro deste espectro, o seu efeito é menos pronunciado no topo em comparação com o nível da superfície. As médias estimadas da Forçante Radiativa (FR) do BC no topo e na superfície foram de  $0,14 \pm 0,10 \text{ W m}^{-2}$  e  $0,52 \pm 0,41 \text{ W m}^{-2}$  respectivamente. Já as da FR do BrC no topo e na superfície foram de  $0,07 \pm 0,03 \text{ W m}^{-2}$  e  $0,52 \pm 0,34 \text{ W m}^{-2}$  respectivamente.

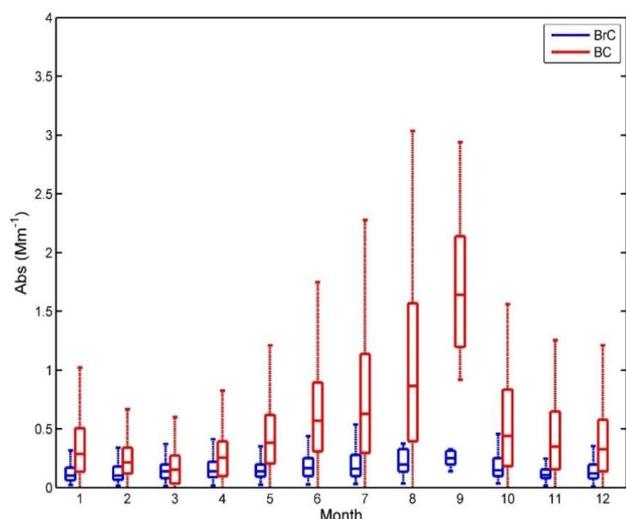


Figura 7. Boxplot mensal das absorções de BrC e BC.  
Figure 7. Monthly boxplot of BrC and BC absorptions.

Tabela 3. Médias e desvios sazonais das frações de FR 24h de BC e BrC nas período seco e chuvoso no Pantanal Mato-grossense.  
Table 3. Seasonal averages and deviations of the 24-h FR fractions of BC and BrC in the dry and rainy seasons in the Pantanal Mato Grosso.

	FR topo ( $\text{W m}^{-2}$ )		FR superfície ( $\text{W m}^{-2}$ )	
	Seca	Chuva	Seca	Chuva
BC	0,22 $\pm 0,20$	0,13 $\pm 0,50$	-0,84 $\pm 0,81$	-0,45 $\pm 0,19$
BrC	0,09 $\pm 0,07$	0,07 $\pm 0,02$	-0,71 $\pm 0,67$	-0,48 $\pm 0,18$

De acordo com a Tabela 3, as médias de FR das frações BC e BrC durante os períodos seco e úmido apresentam efeito de aquecimento no topo da atmosfera e efeito de

resfriamento na superfície. Em condições secas, o BC contribui quase 60% mais que o BrC para o aquecimento atmosférico. Nos períodos chuvosos, a FR do BC diminuiu cerca de 41%, enquanto a do BrC reduziu apenas cerca de 20%. Os efeitos de resfriamento devido a ambos os tipos são maiores durante o tempo seco porque os aerossóis da queima de biomassa tendem a se espalhar mais nesta condição. O estudo conduzido por Feng et al. (2013) investigou as características ópticas dos aerossóis de BC e BrC, bem como suas contribuições individuais para a forçante radiativa na atmosfera. Os resultados indicaram que o BC representa aproximadamente 60% da forçante radiativa no topo da atmosfera, enquanto o BrC contribui com cerca de 40%.

A Figura 8 representa as estatísticas mensais de FR 24 horas para BC e BrC sobre a superfície e topo da atmosfera. Esses resultados mostram que as flutuações na Forçante Radiativa (FR) do BrC são superiores às do BC nos meses com mais chuvas (janeiro, fevereiro e março), enquanto há maiores oscilações na FR do BC nos meses secos, com um pico em setembro. Já para BrC, é perceptível que a FR não varia ao longo do ano, enquanto o BC apresenta forte sazonalidade, com um pico de aquecimento ocorrendo em setembro, geralmente coincidindo com a maior incidência de queimadas registrada tanto na região de estudo quanto na região central do Brasil. Durante os meses de chuva, a forçante radiativa do BrC pode superar a do BC devido à formação de BrC em partículas orgânicas, que tendem a ser mais abundantes nessa época do ano. Além disso, a umidade aumenta a capacidade de absorção de luz pelo BrC, tornando-o mais eficiente na absorção de radiação solar. Isso pode resultar em um aquecimento da atmosfera e contribuir para o derretimento acelerado de geleiras e neve. O estudo de Cheng et al. (2019) durante o período das monções na China revelou que o BrC foi responsável por mais de 50% da forçante radiativa na superfície, enquanto o BC contribuiu com menos de 10%. De acordo com Zhuang et al. (2015) a forçante radiativa do BrC em Xangai durante a estação chuvosa foi cerca de duas vezes maior do que durante o período seco.

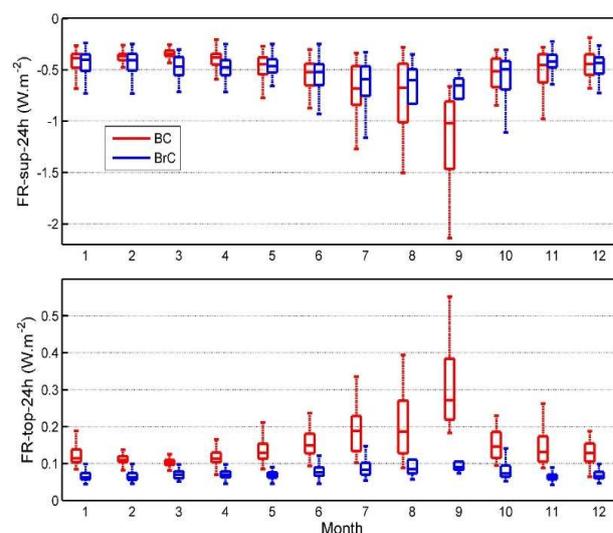


Figura 8. Estatística mensal para os valores de FR 24 horas para BC e BrC sobre a superfície e topo da atmosfera.  
Figure 8. Monthly statistics for 24-hour FR values for BC and BrC over the surface and top of the atmosphere.

## 5. CONCLUSÕES

As médias estimadas para Forçante Radiativa (FR) de Black Carbon (BC) no topo da atmosfera e na superfície foram  $0,14 \pm 0,10$  e  $-0,52 \pm 0,41 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente. Enquanto isso, o FR de Brown Carbon (BrC) no topo e na superfície foram  $0,07 \pm 0,03$  e  $-0,52 \pm 0,34 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente. Os resultados sugerem que as contribuições de FR de BC e BrC para o resfriamento da superfície na região são semelhantes. No entanto, a contribuição de BC para o aquecimento do topo da atmosfera é aproximadamente 60% maior em relação ao BrC no período seco.

Durante o período chuvoso, o FR de BC apresentou uma queda de aproximadamente 41%, enquanto a queda de FR de BrC foi de aproximadamente 20%. Para a superfície, o efeito de resfriamento de BC e BrC é maior durante o período seco. As variações de FR de BrC são maiores do que as de BC nos meses considerados mais chuvosos, enquanto as variações em FR de BC são maiores nos meses de seca, com pico em setembro.

Em comparação com estudos anteriores, os valores obtidos para o FR total do aerossol sobre a superfície variaram de -5 a  $-17 \text{ W m}^{-2}$ . Esse efeito de resfriamento sobre a superfície durante o período seco é atribuído às altas concentrações de aerossóis de queimadas, mesmo que as concentrações de BC sejam elevadas nesse período. Isso ocorre devido ao efeito dominante das partículas espalhadoras, especialmente devido às elevadas concentrações de orgânicos.

## 6. REFERÊNCIAS

ARTAXO, P.; RIZZO, L. V.; BRITO, J. F.; BARBOSA, H. M. J.; ARANA, A.; SENA, E. T.; CIRINO, G. G.; BASTOS, W.; MARTIN, S. T.; ANDREA, M. O. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discussions*, v. 165, p. 203-235, 2013. <https://doi.org/10.1039/C3FD00052D>

BOND, T. C.; DOHERTY, S. J.; FAHEY, D. W.; FORSTER, P. M.; BERNTSEN, T.; DE ANGELO, B. J.; FLANNER, M. G.; GHAN, S.; et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, v. 118, n. 11, p. 5380-5552, 2013. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>

BOND, T. C.; BERGSTROM, R. W. Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review. *Aerosol science and technology*, v. 40, n. 1, p. 27-67, 2006. <https://doi.org/10.1080/02786820500421521>

CHEN, Y.; BOND, T. C. Light absorption by organic carbon from wood combustion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, n. 4, p. 1773-1787, 2010. <https://doi.org/10.5194/acp-10-1773-2010>

CHENG, Y.; ZHENG, G.; WEI, C.; MU, Q.; ZHENG, B.; WANG, Z.; GAO, M.; ZHANG, Q.; HE, K.; CARMICHAEL, G.; PÖSCHL, U.; SU, H. Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China. *Science Advances*, v. 2, n. 12, e1601530, 2016. <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1601530>

FANTIN-CRUZ, I.; GIRARD, P.; ZEILHOFER, P.; COLLISCHONN, W.; NUNES DA CUNHA, C. Historical reconstruction of floodplain inundation in the Pantanal (Brazil) using neural networks. *Journal of*

*Hydrology*, v. 399, p. 376-384, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.014>

FENG, Y.; RAMANATHAN, V.; KOTAMARTHI, V. R. Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation? *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 17, p. 8607-8621, 2013. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8607-2013>

HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; TANRÉ, D.; BUIS, J. P.; SETZER, A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J. A.; KAUFMAN, Y. J.; NAKAJIMA, T.; LAVENU, F.; JANKOWIAK, I.; SMIRNOV, A. AERONET – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, v. 66, p. 1-16, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)

IPCC\_the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; LOURIVAL, R.; WITTMANN, F.; KANDUS, P.; LACERDA, L. D.; BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; NUNES DA CUNHA, C.; MALTCHIK, L.; SCHÖNGART, J.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; AGOSTINHO, A. A. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 24, p. 5-22, 2014. <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>

KIRCHSTETTER, T. W.; NOVAKOV, T.; HOBBS, P. V. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, v. 109, e1208, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004JD004999>

LACK, D. A.; LANGRIDGE, J. M. On the attribution of black and brown carbon light absorption using the Ångström exponent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 20, p. 10535-10543, 2013. <https://doi.org/10.5194/acp-13-10535-2013>

MORAIS, F. G.; FRANCO, M. A.; PALÁCIOS, R.; MACHADO, L. A. T.; RIZZO, L. V.; BARBOSA, H. M. J.; JORGE, F.; SCHAFER, J. S.; HOLBEN, B. N.; LANDULFO, E.; ARTAXO, P. Relationship between land use and spatial variability of atmospheric brown carbon and black carbon aerosols in Amazonia. *Atmosphere*, v. 13, e1328, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13081328>

PALÁCIOS, R.; ROMERA, K. S.; RIZZO, L.; CIRINO, G.; ADAMS, D.; IMBIRIBA, B.; NASSARDEN, D.; ROTHMUND, L. D.; SIQUEIRA, A.; MARQUES, J. B.; RODRIGUES, T. R.; CURADO, L. A.; WEBER, A.; NOGUEIRA, J. de S.; MORAIS, F.; ARTAXO, P. Optical properties and spectral dependence of aerosol light absorption over the Brazilian Pantanal. *Atmospheric Pollution Research*, v. 13, n. 5, e101413, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101413>

PALÁCIOS, R. S.; ROMERA, K. S.; CURADO, L. F. A.; BANGA, N. M.; ROTHMUND, L. D.; SALLO, F. da S.; MORAIS, D.; SANTOS, A. C. A.; MORAES, T. J.; MORAIS, F. G.; LANDULFO, E.; FRANCO, M. A. de M.; KUHNEN, I. A.; MARQUES, J. B.; NOGUEIRA, J. de S.; VALLE JUNIOR, L. C. G. do; RODRIGUES,

- T. R. Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin. **Aerosol Air Quality Research**, v. 20, p. 139-154, 2020. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0189>
- PALÁCIOS, R.; SALLO, F. S.; SANTOS, A. C. A.; NOGUEIRA, J.; SANTANNA, F. B. Estimativa da forçante radiativa direta de aerossóis sobre a superfície em região de transição pantanal-cerrado no estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, p. 132-141, 2015. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v16i0.39801>
- PALÁCIOS, R.; SALLO, F.; PRADO, M.; DE MUSIS, C. R.; NOGUEIRA, J. S. Análise da profundidade ótica de aerossóis e coeficiente de Angstrom no cerrado Mato-grossense. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, p. 173-185, 2014. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v14i1.35770>
- PONCZEK, M.; FRANCO, M. A.; CARBONE, S.; RIZZO, L. V.; SANTOS, D. M.; MORAIS, F. G.; DUARTE, A.; BARBOSA, H. M. J.; ARTAXO, P. Linking the chemical composition and optical properties of biomass burning aerosols in Amazonia. **Environmental Science: Atmospheres**, v. 2, p. 252-269, 2022. <http://dx.doi.org/10.1039/D1EA00055A>
- PROCOPIO, A.S.; ARTAXO, P.; KAUFMAN, Y.J.; REMER, L.A.; SCHAFER. Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. **Geophysical Research Letters**, v. 31, p. L03108, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003GL018646>
- RAMANATHAN, V.; CARMICHAEL, G. Global and regional climate changes due to black carbon. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 4, p. 221-227, 2008. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo156>
- RIZZO, L. V.; ARTAXO, P.; MÜLLER, T.; WIEDENSOHLER, A.; PAIXÃO, M.; CIRINO, G. G.; ARANA, A.; SWIETLICKI, E.; ROLDIN, P.; FORS, E. O.; WIEDEMANN, K. T.; LEAL, L. S. M.; KULMALA, M. Long-term measurements of aerosol optical properties at a primary forest site in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, p. 2391-2413, 2013. <https://doi.org/10.5194/acp-13-2391-2013>
- RIZZO, L. V.; CORREIA, A. L.; ARTAXO, P.; PROCOPIO, A. S.; ANDREAE, M. O. Spectral dependence of aerosol light absorption over the Amazon Basin. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 17, p. 8899-8912, 2011. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8899-2011>
- SANTOS, A. C. A.; FINGER, A.; NOGUEIRA, J. D. S.; CURADO, L. F. A.; PALÁCIOS, R. S.; PEREIRA, V. M. R. Analysis of the concentration and composition of aerosols from fires in the Mato Grosso wetland. **Química Nova**, v. 39, p. 919-924, 2016. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20160105>
- SATURNO, J.; HOLANDA, B. A.; PÖHLKER, C.; DITAS, F.; WANG, Q.; MORAN-ZULOAGA, D.; BRITO, J.; CARBONE, S.; CHEGN, Y.; CHI, X. et al. Black and brown carbon over central Amazonia: long-term aerosol measurements at the ATTO site. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, p. 12817-12843. <https://doi.org/10.5194/acp-18-12817-2018>
- SENA, E. T.; ARTAXO, P.; CORREIA, A. L. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosols and the effects of land use change in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 3, p. 1261-1275, 2013. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1261-2013>
- WANG, X.; HEALD, C. L.; SEDLACEK, A. J.; DE SÁ, S. S.; MARTIN, S. T.; ALEXANDER, M. L.; WATSON, T. B.; AIKEN, A. C.; SPRINGSTON, S. R.; ARTAXO, P. Deriving brown carbon from multiwavelength absorption measurements: method and application to AERONET and Aethalometer observations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, p. 12733-12752, 2016. <https://doi.org/10.5194/acp-16-12733-2016>
- ZHUANG, B. L.; WANG, T. J.; LIU, J.; MA, Y.; YIN, C. Q.; LI, S.; XIE, M.; HAN, Y.; ZHU, J. L.; YANG, X. Q. FU, C. B. Absorption coefficient of urban aerosol in Nanjing, west Yangtze River Delta, China. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, p. 13633-13646, 2015. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13633-2015>

**Agradecimentos:** Ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e ao Laboratório de Computação Meteorológica da Faculdade de Meteorologia (LACOMET) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

**Contribuição dos autores:** D.N. e R.P.: conceituação, metodologia e redação (revisão e edição); L.G.D. e K.S.R.R.: metodologia e análise estatística; L.F.A.C. J.B.M. e T.R.R.: redação, revisão e edição.

**Disponibilidade de dados:** Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

**Conflito de interesses:** Os autores declaram não haver conflito de interesses.



**Copyright:** © 2024 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).