



Efeitos da concentração de *black carbon* na radiação e emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense

Thamiris Amorim dos Santos¹, Haline Josefa Araujo da Silva², André Matheus de Souza Lima³, Sergio Roberto de Paulo⁴, Iramaia Jorge Cabral de Paulo⁵, Rafael da Silva Palácios⁶, João Basso Marques⁶, Leone Francisco de Amorim Curado⁷

¹Graduada em Engenharia Florestal e Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental na Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, e-mail de correspondência: thamirisflorestal@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6559-7352; ²Mestre em Física Ambiental e Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental na Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, e-mail de correspondência: haline.jas@fisica.ufmt.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8418-4788>. ³Graduado em Física e Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental na Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, e-mail de correspondência: andre.souza@fisica.ufmt.br, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6673-8640>, ⁴Professor Doutor e pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, e-mail de correspondência: sergioufmont@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5101-6227>, ⁵Professora Doutora e Pesquisadora do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, e-mail de correspondência: iramaiaj@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2581-1681>, ⁶Professor Doutor e pesquisador do Instituto de Geociências pela Universidade Federal do Pará – Campus Guamá, e-mail de correspondência: rafael.pgfa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7628-1342> ⁷Professor Doutor e pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, e-mail de correspondência: jbassofisico@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8719-8184>, ⁸Professor Doutor e pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, e-mail de correspondência: leone.curado@fisica.ufmt.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0375-7725>.

Artigo recebido em 15/01/2024 e aceito em 20/08/2024

RESUMO

O Pantanal é um dos maiores sistemas alagados do mundo e desempenha um papel significativo na biodiversidade e no ecossistema local. No entanto, o aumento do desmatamento e dos incêndios florestais na região se tornou uma das principais fontes de emissão de aerossóis atmosféricos na região. O *Black Carbon* é um aerossol que tem a capacidade de absorver a luz solar, contribuindo para o aquecimento da atmosfera e alterando o balanço de radiação Terra-atmosfera. O objetivo da pesquisa é analisar os efeitos das concentrações do *Black Carbon* na capacidade de espalhamento e absorção da Radiação Global (Rg), Radiação Líquida (Rn), e Emissividade Atmosférica (E) na região do Pantanal Mato-Grossense. Foram coletados dados de uma torre micrometeorológica, localizada na Base Avançada de Pesquisas do Pantanal (BAPP) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), na Fazenda Bahia das Pedras, na RPPN SESC no município de Poconé - MT entre os anos 2017 a 2019. A análise estatística dos dados envolveu a aplicação de regressão linear e o Co-espectro para analisar eventos específicos e padrões sazonais. Os resultados apontam para uma influência significativa do *Black Carbon* com concentrações significativas acima de $0,10 \mu\text{m}^3$ sobre as variáveis meteorológicas. Durante o período abordado observou-se uma redução notável na Rg e Rn devido à capacidade de absorção do BC, tendo como consequência o aquecimento de camadas atmosféricas. Também notou-se que em altas concentrações o BC promove o bloqueio da Emissividade Atmosférica. Na análise do Co-espectro uma interdependência entre a concentração de BC e as variáveis relacionadas à radiação com periodicidade de 1 ano. A pesquisa mostra a importância de considerar o BC como um componente relevante nas discussões sobre mudanças climáticas e interações entre aerossóis e variáveis micrometeorológicas no Pantanal.

Palavras-chave: sazonalidade, aerossóis, mudanças climáticas, variáveis micrometeorológicas.

Effects of *Black Carbon* Concentration on Radiation and Atmospheric Emissivity in the Pantanal Mato-Grossense

ABSTRACT

The Pantanal is one of the world's largest wetland systems and plays a significant role in biodiversity and the local ecosystem. However, the increase in deforestation and forest fires in the region has become a major source of atmospheric aerosol emissions. *Black Carbon* is an aerosol with the ability to absorb sunlight, contributing to atmospheric warming and altering the Earth-atmosphere radiation balance. The objective of the research is to analyse the effects of *Black Carbon* concentrations on the scattering and absorption capacity of Global Radiation (Rg), Net Radiation (Rn), and Atmospheric Emissivity (E) in the Pantanal Mato-Grossense region. Data were collected from a micrometeorological tower located at the Pantanal Advanced Research Base (BAPP) of the Federal University of Mato Grosso (UFMT), at Fazenda Bahia das Pedras, in the RPPN SESC municipality of Poconé - MT between the years 2017 and 2019. Statistical analysis of the data involved the application of linear regression and Co-spectrum to analyse specific events and seasonal patterns. The results indicate a significant influence of *Black Carbon* with concentrations above $0.10 \mu\text{m}^3$ on meteorological variables. During the covered period, there was a notable reduction in Rg and Rn due to the absorption capacity of BC, resulting in the heating of atmospheric layers. It was also observed that at high concentrations, BC promotes the blocking of Atmospheric Emissivity. In the Co-spectrum analysis, there was an interdependence between variables over a one-year period. The research underscores the importance of considering BC as a relevant component in discussions about climate change and interactions between aerosols and micrometeorological variables in the Pantanal.

Keywords: seasonality, aerosols, climate change, micrometeorological variables.

Introdução

A atmosfera está sujeita a diversas alterações originadas pelas ações antrópicas, sendo que a poluição atmosférica continua a ser um grande problema. Os aerossóis antropogênicos como o *Black Carbon* (BC), proveniente da queima incompleta de combustíveis fósseis, queima de biomassa e biocombustíveis, tornaram-se assunto de grande interesse ambiental e uma das principais áreas de pesquisa da comunidade científica (MARTINS, 2006), de acordo com Li (2024), o BC é o aerossol significativo na atmosfera que absorve luz, intensificando seu impacto nas alterações climáticas globais. Isto ocorre devido ao seu impacto climático e na saúde humana, embora ainda permaneçam incertezas na quantificação de seus efeitos. Depois do dióxido de carbono (CO_2), o BC é o segundo maior contribuinte para o aquecimento global. Sendo um forte absorvedor da radiação solar, ele aquece a atmosfera ao passo em que reduz a irradiância solar no solo, alterando assim o balanço de radiação do sistema terra-atmosfera (BIBI et al., 2017).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC), estima-se que as emissões globais anuais de BC são de aproximadamente 8 Tg ano^{-1} e contribuem com $0,2\text{--}0,4 \text{ Wm}^{-2}$ para o forçamento radiativo (FORSTER et al., 2007). Por ter um tempo de vida atmosférico relativamente curto (cerca de 7 dias), as variações espaço-temporais das concentrações das partículas de BC dependem consideravelmente das fontes de emissão e das condições meteorológicas do local, e esses dois processos variam muito dependendo da região (ZHANG et al., 2020). No Brasil, a maior fonte de aerossóis antrópicos é oriunda das emissões por queima de biomassa (ARTAXO et al., 2006), que é uma

prática agrícola comumente utilizada. Durante os meses da estação seca, principalmente de agosto a outubro, as queimadas se intensificam, o que faz com que boa parte do Brasil e da América do Sul fique envolta por fumaça que cobre milhões de quilômetros quadrados (GRIMM et al., 2012).

O domínio fitogeográfico do Pantanal é um dos ecossistemas mais ricos e diversificados do Brasil, abrigando um total de 1.858 espécies distribuídas em 196 famílias de plantas, fungos e algas (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2023). Contudo, essa biodiversidade está cada vez mais ameaçada por atividades antropogênicas. Nas áreas do Pantanal, os impactos mais significativos estão associados às práticas agrícolas na região do planalto e aos cultivos em áreas da planície, especialmente na bacia do Rio Miranda. Os rios Taquari (MS) e Cuiabá/São Lourenço (MT), fundamentais para a formação do Pantanal, têm sofrido com o assoreamento resultante dos desmatamentos e das lavouras (Vallejo, 2010). Além disso, o aumento na concentração de partículas de aerossol provenientes de incêndios na região tem causado mudanças estatisticamente significativas em variáveis meteorológicas, como a temperatura do dossel foliar e o déficit de pressão de vapor (VPD), o que pode ter efeitos importantes na fotossíntese e na absorção de carbono (Rodrigues et al., 2024).

As emissões no Pantanal devido à queima de biomassa podem impactar os fluxos radiativos, modificando a dinâmica do ecossistema. Dependendo da carga de aerossóis na atmosfera e das propriedades ópticas dessas partículas, a quantidade de radiação solar difusa pode aumentar, resultando em maior eficiência no processo de fotossíntese e maior fixação de carbono (CIRINO et al. 2014). Porém, se a emissão apresentar fortes propriedades absorptivas a ponto de impedir que a

radiação chegue à superfície, o processo de fotossíntese pode ser interrompido, gerando um déficit na fixação de carbono (ARTAXO et al. 2013).

O Pantanal se localiza no centro da América do Sul, conhecido como a maior floresta alagável do mundo, possui uma rica biodiversidade de fauna e flora, é uma região de enorme importância ecológica e socioeconômica, que se destaca pela sua biodiversidade e pelo seu regime hidrológico peculiar (Ministério do Meio Ambiente, 2007). Foi reconhecido como patrimônio nacional pela Constituição Federal Brasileira de 1988 e patrimônio mundial pela Unesco em 2000.

Atualmente, o Pantanal vive uma das fases mais críticas de degradação ambiental. A expansão do agronegócio e a mudança de uso da terra para produção agrícola e pecuária trouxeram como consequência o aumento do desmatamento e dos incêndios. Toda essa degradação é responsável pelo aumento da concentração de aerossóis antropogênicos. Isto pode alterar a composição atmosférica, causando um desequilíbrio no balanço de radiação, contribuindo assim para mudanças na temperatura, ciclo hidrológico, estabilidade atmosférica e interações biosfera-atmosfera da região (Ramachandran, Kedia 2011). A combinação de aerossóis e gases emitidos possui papel importante no balanço energético, podendo contribuir significativamente na estrutura da atmosfera, alterando sua estabilidade e, potencialmente, alterando o clima regional (Santos, 2014).

Existem pesquisas nos mais diversos contextos quando se trata do bioma Pantanal, devido a sua importância de ordem biológica, ecológica e climática, porém ainda há necessidade de análises direcionadas a propriedades da

interação dos aerossóis atmosféricos com a radiação solar de forma que a concentração do BC nessa região é intensificada no período de queimadas que vai de maio a outubro, isto sendo extremamente importante para se compreender a dinâmica atmosférica local, portanto viu-se nesta pesquisa o intuito de realizar uma análise mais detalhada na dispersão e nos efeitos que as partículas dos aerossóis causam no espectro de radiação solar em uma floresta tropical.

Assim, os objetivos do presente estudo são: (a) analisar os efeitos do *Black Carbon* na capacidade de espalhamento e absorção da Radiação Global (Rg), Radiação Líquida (Rn) e Emissividade Atmosférica do Pantanal Mato-Grossense; (b) avaliar a relação entre BC e as variáveis radiação e emissividade; (c) identificar a escala de tempo em que as concentrações do BC apresentam correlações.

Material e métodos

Área de Estudo

A pesquisa foi realizada na Base Avançada de Pesquisas do Pantanal (BAPP) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), na Fazenda Bahia das Pedras, na Reserva Particular Do Patrimônio Natural -RPPN SESC no município de Poconé, Mato Grosso Brasil (Figura 1). A média da precipitação anual fica em torno de 1.400 mm e a temperatura média anual da região é de 26,1 °C (Biudes et al. 2015).

A Torre Micrometeorológica do Pantanal (Figura 01, a direita), consiste em uma estrutura de ferro galvanizado com patamar de 20m de altura além de uma extensão de 12m, totalizando 32 metros de altura. Esta estrutura possibilita a instalação de diversos equipamentos e sensores para monitoramento de variáveis microclimáticas.

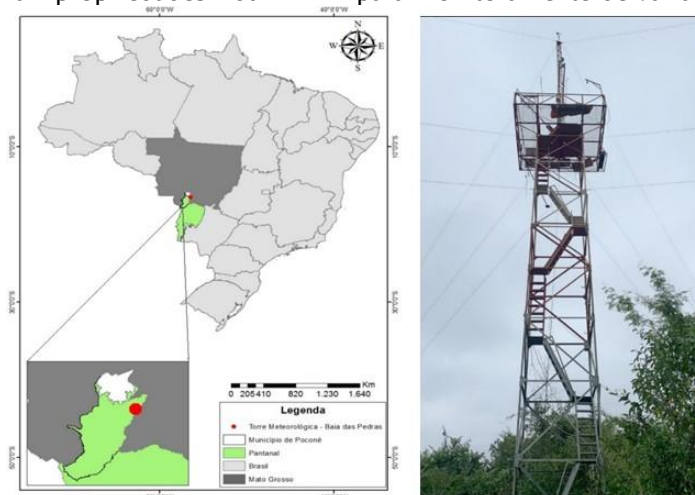


Figura 1. Localização Torre Micrometeorológica na Fazenda Bahia das Pedras, município de Poconé-MT.

Dados

Os dados meteorológicos foram coletados nos anos de 2017 a 2019, por meio de sensores de aquisição de dados, ligado a um datalogger CR 1000 (Campbell Scientific, Inc., USA), com intervalo de leitura de 30 segundos e registro das médias a cada 30 minutos, ou seja, a cada 30 segundos é coletado um dado e feito a média desses dados a cada 30 minutos.

Método

Segundo Capp & Nienov (2020), a regressão linear estima os coeficientes da equação linear, com o objetivo prever o comportamento de uma variável dependente (quantitativa) em função de uma (simples) ou mais (múltipla) variáveis independentes (quantitativas ou qualitativas binárias).

Assume-se a relação entre as variáveis por meio de uma reta e, assim, utiliza-se o resultado da função dessa reta para estimar valores, quando conhecemos as variáveis que afetam o seu comportamento.

Os dados foram processados utilizando o software Python, utilizando o pacote *scipy* e a função *linregress*. Foram criados gráficos de regressão linear para analisar a correlação entre a concentração de BC ($880 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e as variáveis micrometeorológicas. A análise de correlação entre BC e R_g foi realizada durante o período diurno, considerando das 06:00 até as 17:30 horas. A correlação entre BC e R_n foi considerada em ambos os períodos. A análise com a Emissividade foi realizada no período noturno, abrangendo o horário das 18:00 às 05:30 horas.

Segundo Rayl et al., (2012), a densidade espectral de potência cruzada entre duas matrizes de dados também é chamada de co-espectro, a medida de similaridade entre as respectivas densidades espectrais de potência. O co-espectro é um produto do espectro de fase de valor complexo, uma medida do deslocamento de fase, atrasado ou adiantado, entre as duas matrizes e o espectro de amplitude cruzada ou espectro de coerência, uma

medida da similaridade das magnitudes dos componentes de frequência. O co-espectro é definido pela relação exibida na equação 1.

Onde $x(n)$ é a primeira série temporal e $y(n)$ é a segunda série temporal, e $S_{xy}(\gamma)$ é um número de valor complexo cuja magnitude é o espectro de coerência ($\gamma_{xy}(\gamma)$) e ϕ ângulo é a fase espectro ($\gamma_{xy}(\gamma)$).

O co-espectro pode ser usado como base para corrigir fluxos não detectados causados por limitação na medição (Wolf e Laca, 2007), ou seja, o uso do deste método como base para corrigir fluxos não detectados implica em usar a análise de covariância entre os sinais para melhor compreender a relação entre os dados de entrada e saída. Para analisar a correlação entre as variáveis por meio do co-espectro, os dados foram processados no software R, na versão 4.3.1. Utilizando esses dados, foram criados gráficos que incluíam as variáveis R_g , R_n e Emissividade em relação ao BC.

Neste trabalho, o co-espectro é utilizado para avaliar a escala de tempo em que as variáveis estudadas, concentração de *Black Carbon*, radiação e emissividade, estão acopladas. Essa medida é necessária para avaliar em que escala de tempo as médias temporais das variáveis devem ser integradas para otimizar a extração de informação da sua correlação.

Resultados e discussão

Focos de queimadas e Uso Consolidado do Solo no Pantanal

A figura 2 baseia-se na classificação de Uso Consolidado do solo disponibilizada pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA-MT, 2023). De acordo com as diretrizes Uso Consolidado é a área do imóvel rural que demonstra ocupação humana pré-existente a 22 de julho de 2008, incluindo edificações, benfeitorias ou atividades agrossilvipastoris. A Figura 3 apresenta os focos de queimadas na região do Pantanal no território brasileiro no período de 2017 a 2019, com base em dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

$$S_{xy}(\gamma) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\gamma n} \left(\sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{j\gamma n} \right)^* \\ = \gamma_{xy}(\gamma) \gamma_e \quad \gamma_{\gamma\gamma_{xy}(\gamma)} \quad [6]$$

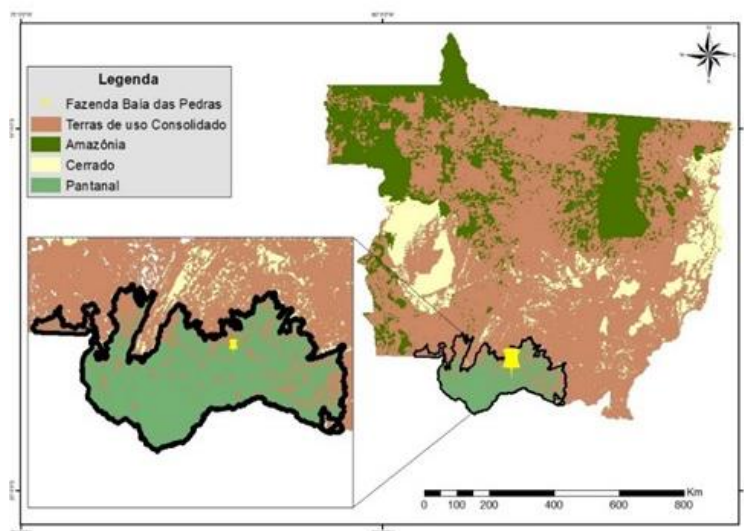


Figura 2. Classificação de Uso Consolidado do solo no Pantanal Mato-Grossense

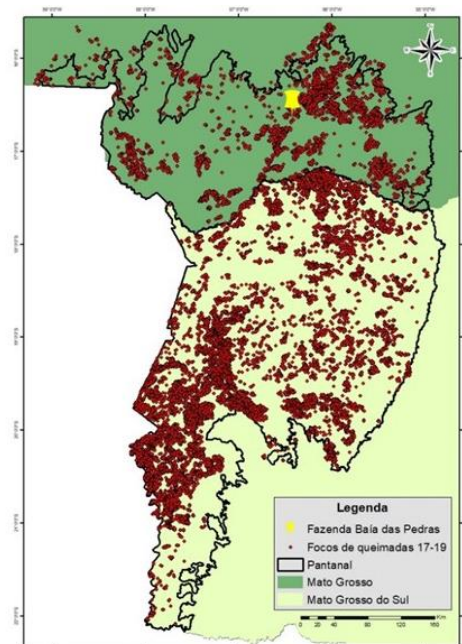


Figura 3. Focos de queimadas na região do Pantanal no território brasileiro no período de 2017 a 2019.

No Pantanal de Mato Grosso, uma prática amplamente estabelecida é a utilização do fogo como ferramenta para a limpeza de pastagens, a preparação de áreas agrícolas e a criação de condições favoráveis para a expansão das atividades pecuárias.

Rodrigues et al. (2014) realizaram um estudo que registrou um total de 5.138 focos de calor no Pantanal durante o período de agosto de 2011 a julho de 2014, com os municípios de Cáceres, Poconé, Barão de Melgaço, Santo

Antônio do Leverger, Nossa Senhora do Livramento, Itiquira e Lambari D'Oeste sendo os mais afetados por focos de queimada.

Viganó et al. (2018) destacaram que na estação de estiagem, as condições climáticas, como altas temperaturas, radiação solar intensa, baixa umidade relativa do ar e ventos, criam um ambiente propício para a propagação de incêndios no Pantanal. Eles ressaltaram a influência da ação humana, que se intensifica nos meses mais secos, ampliando os focos de queimada. Pinto (2014)

observou que nos municípios de Cáceres, Poconé e Barão de Melgaço, localizados no Bioma Pantanal, a prática de queimadas como método de manejo e o desmatamento para a criação de pastagens têm sido históricas.

A Fiocruz (2020) afirmou que as queimadas no Pantanal no ano de 2020 atingiram mais de 44.998 km² o que representa pouco mais de 30% do território do bioma no território brasileiro, incluindo áreas de unidades de

A figura 4 ilustra a variação sazonal do BC horária e mensal nos três anos estudados.

conservação. Além disso, em 2020, o número de focos de queimadas no Pantanal superou significativamente os focos de queimadas na Amazônia, apesar de o bioma Pantanal ser 36 vezes menor que o amazônico.

Variação temporal da Concentração de Black Carbon no Pantanal Mato-Grossense

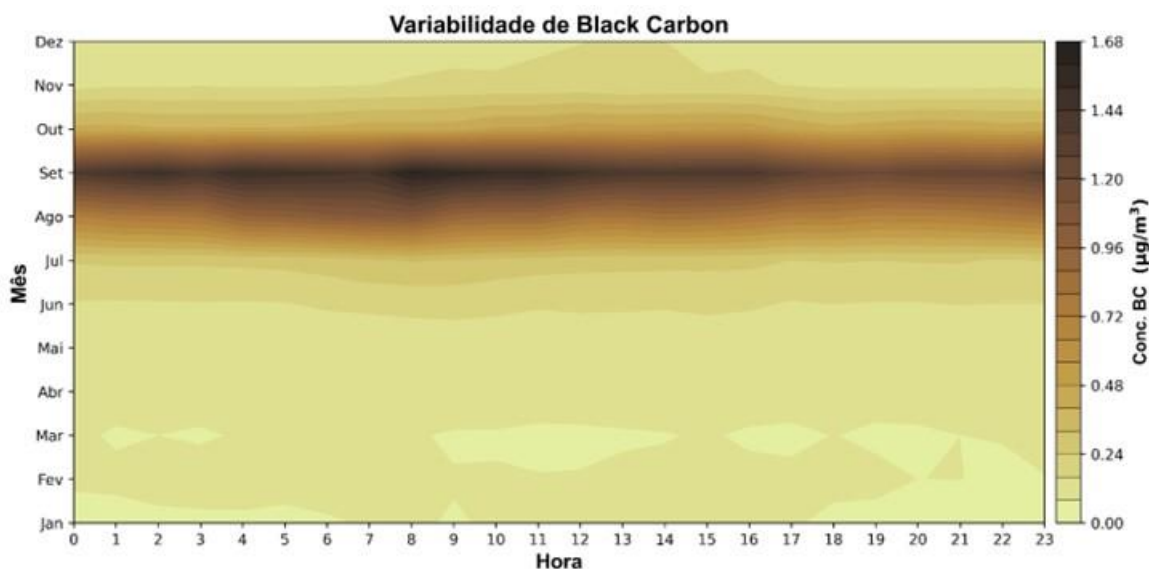


Figura 4. Variação sazonal da concentração de *Black Carbon* em relação aos meses e horários nos anos entre 2017 a 2019.

Observa-se que as concentrações mais elevadas desse aerossol ocorrem durante os meses do período quente e seco do Pantanal, sendo mais proeminentes em setembro, quando atingem valores próximos a 1,7 µg/m³. Essa tendência sugere que a presença de BC é mais acentuada devido às queimadas que ocorrem nesse período no bioma. Em contraste, durante o período chuvoso, não se observam concentrações superiores a 0,24 µg/m³. Em relação ao horário de maior concentração ocorre das 01h00min da manhã ao meio-dia, totalizando aproximadamente 12 horas de concentrações elevadas de aerossol, o que sugere que durante o período noturno, há uma maior quantidade de BC presente na região estudada. Outros estudos também identificaram padrões sazonais semelhantes. Por exemplo, Santos et al., em 2018, utilizou técnicas de gravimetria e refletância durante o período de abril de 2012 a agosto de 2013 na região do Pantanal,

encontraram uma concentração máxima de BC de 0,189 µg/m³ em setembro de 2012.

As concentrações de BC são influenciadas por fontes antropogênicas (Sharma et al., 2018) e pelas condições meteorológicas locais. Estudos anteriores, como os de Dumka et al., em 2018, e Magalhães Neto et al., em 2017, indicam que as emissões de BC de origem antropogênica em escala global são atribuídas principalmente à combustão de biocombustíveis (~20%), combustíveis fósseis (~40%) e à queima aberta de biomassa, incluindo incêndios florestais e queima de resíduos agrícolas (~40%). Essas proporções variam dependendo se a área é urbana ou rural, com emissões veiculares predominando em ambientes urbanos e a queima de biomassa predominando em áreas rurais. A alta concentração de Carbono Negro sugere que o ar está significativamente poluído devido às atividades humanas. Silva (2021) também identificou que há um padrão sazonal na variação média das concentrações de BC. As

concentrações de BC são mais altas no período seco (maio a setembro) do que no período chuvoso (entre outubro e abril) sendo que os meses de

A variação média mensal da concentração de BC para os anos de 2017, 2018 e 2019 é mostrada na figura 5, os dados foram

agosto e setembro se destacam como os meses que apresentam as mais altas concentrações de BC em comparação com os outros.

coletados considerando o período de 30 dias e realizando a média aritmética dos meses dos anos estudados.

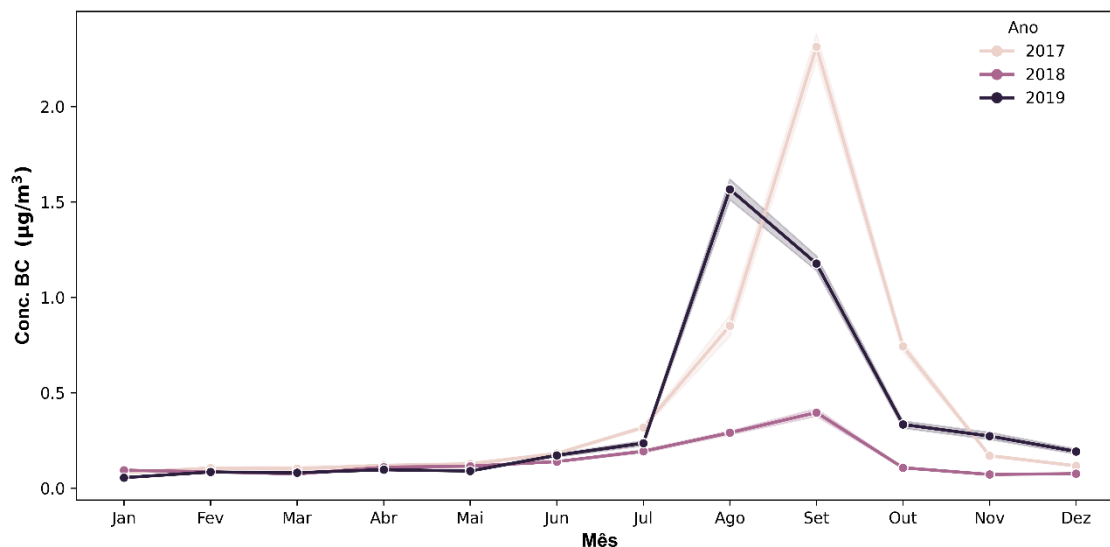


Figura 5. Médias mensais da concentração do *Black Carbon* nos anos de 2017 a 2019. Fonte: Elaborado pelos autores

Nos cinco primeiros meses de dos três anos estudados, observamos que as concentrações de BC se mantiveram praticamente constantes, com valores em torno de $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de junho houve um aumento gradual até atingir o pico no mês de setembro em 2017 ultrapassando passando de $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o mês de outubro o valor da concentração de BC caiu para menos de $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e nos meses seguintes esses valores voltaram a decair aos valores dos primeiros meses. No ano de 2018, observamos um comportamento semelhante ao ano anterior na concentração de BC apesar de a magnitude ser diferente, devido a queima da biomassa ter sido intensa em 2017 e não se regenerando por completo em 2018. Nos primeiros meses podemos notar que as concentrações de BC se mantiveram praticamente constantes em torno de $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir do mês de julho os valores começam a subir e em setembro foi o mês com maior concentração de BC ($0,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Já no mês de outubro a concentração de BC diminuiu para $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mantendo-se em baixos níveis em novembro e dezembro. Um padrão similar aos anos anteriores foi observado no ano de 2019: de janeiro a maio houve sutis variações nas concentrações de BC. Em agosto houve a maior concentração de BC

aproximadamente $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de setembro ($1,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A partir do mês de outubro as concentrações de BC começaram a diminuir gradativamente.

É interessante notar que houve uma redução na concentração de BC de 2017 para 2018, de aproximadamente 87%. Em 2019 a concentração de BC volta a subir, mas ainda é menor que a concentração de BC 2017. Nos três anos estudados podemos notar que há um padrão sazonal na variação média das concentrações de BC. As concentrações de BC são mais altas no período seco (maio a setembro) do que no período chuvoso (entre outubro e abril) sendo que os meses de agosto e setembro se destacam como os meses que apresentam as mais altas concentrações de BC em comparação com os outros.

Análise do Co-Espectro da Relação Entre Black Cabon e as Variáveis Meteorológicas

A Figura 6 se refere à análise do Co-espectro, buscando identificar padrões de influência mútua entre BC e as variáveis Rg, Rn e E.

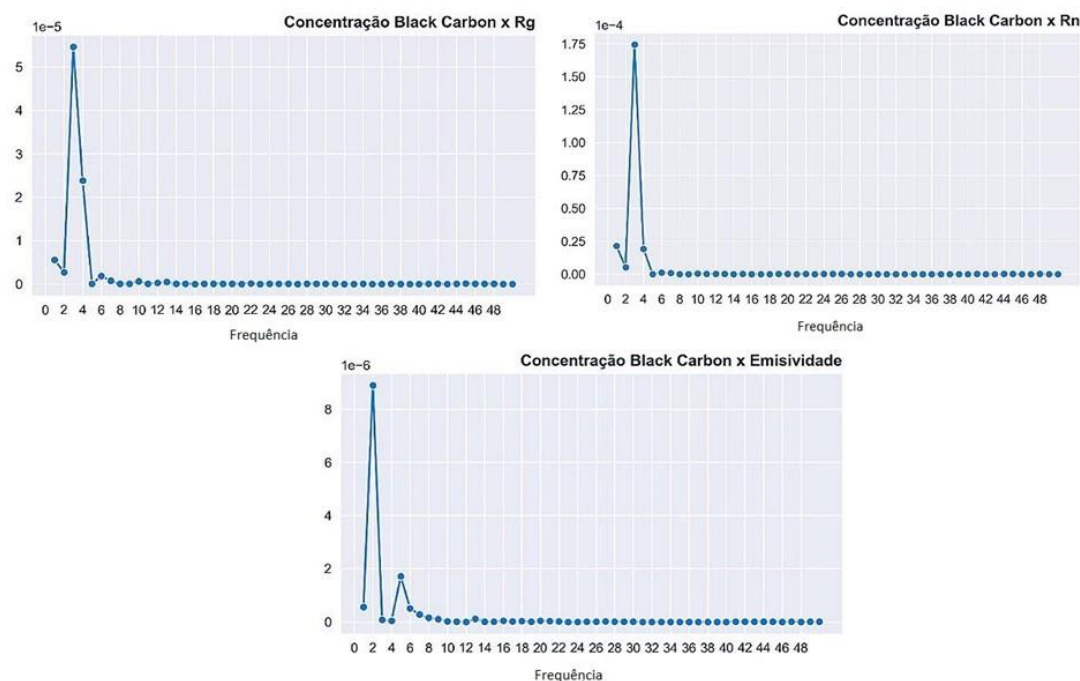


Figura 6. Co-espectro das variáveis estudadas: *Black Carbon*, Radiação Global, Radiação Líquida e Emissividade.

Como já citado, o Co-espectro é um método analítico que permite investigar a relação entre dados para diferentes periodicidades, procurando padrões de mútua influência entre esses dados (RAYL et al., 2012). Observa-se na Figura 6, a presença de um pico no eixo x, localizado em 3. Considerando o período de análise de 3 anos, indica que a periodicidade de maior correlação entre os dados é de 1 ano, devido a frequência ser dividida pelo tempo estudado. Tal resultado é um indício de que, para encontrar uma correlação entre as variáveis estudadas, séries temporais de vários meses são necessárias. Assim sendo, a correlação

não se estabelece para intervalos de tempos curtos (intervalo diário, por exemplo).

Correlação do *Black Carbon* com variáveis meteorológicas

A figura 7 ilustra a correlação linear entre as concentrações de BC acima de $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (eixo x) e R_g (eixo y) nos anos de (a) 2017, (b) 2018 e (c) 2019, utilizando-se médias mensais no período diurno, considerando a incidência solar entre 06h00min às 17h30min. Este intervalo proporciona uma visão da influência do BC na radiação solar ao longo do dia.

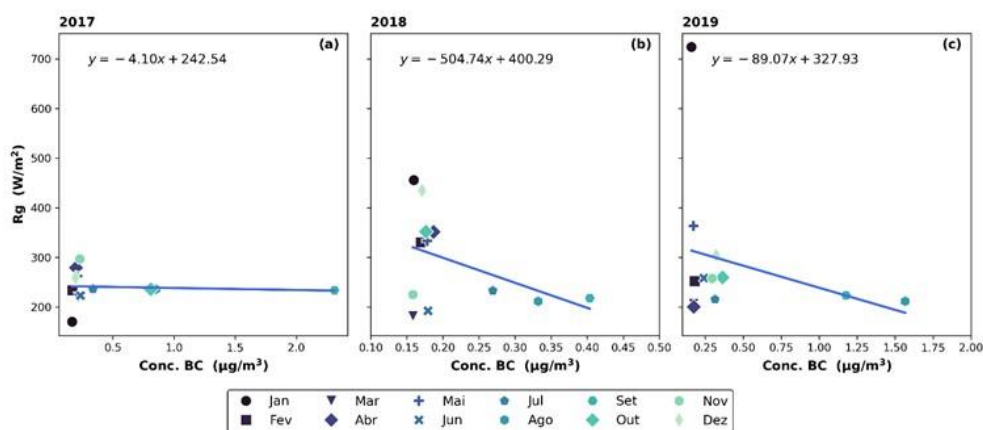


Figura 7. Correlação entre a concentração de *Black Carbon* e Radiação Global para todo o período estudado.

No gráfico (a) referente a 2017, observamos que as concentrações de BC e Rg não apresentam uma correlação observável, sendo que a radiação global se mantém baixa ao longo de todo o ano. No gráfico (b), referente à 2018, notamos que quando a concentração de aerossol atinge $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, há um notável declínio da Rg ficando abaixo de $300 \text{ (W/m}^2\text{)}$ sendo mais pronunciada durante os meses de julho, agosto e setembro. É importante ressaltar que esses meses coincidem com um período de maior concentração de BC, devido a maior incidência de incêndios e queimadas neste período. O gráfico (c) relativo a 2019, é possível observar uma diminuição acentuada na Radiação Global quando as concentrações de BC ultrapassam $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante os meses de agosto e setembro, a concentração de BC atinge até $1,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, resultando em uma redução significativa na Radiação Global, com uma perda de até 200 W/m^2 . Em resumo, os gráficos indicam que as concentrações de BC acima de $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ têm uma influência notável na variação da Radiação Global. Isso sugere que o aumento na concentração de aerossol pode desempenhar um papel na modulação da chegada da Rg à superfície.

A interação da radiação com os aerossóis se dá de duas formas diferentes: absorção e espalhamento. Esses processos têm efeito direto no

equilíbrio de radiação da Terra por meio das chamadas “interações aerossol-radiação” (Charlson et al., 1992, Satheesh e Ramanathan, 2000). Segundo IPCC (2007) o aerossol BC absorve uma grande fração da radiação solar e é considerado um componente importante para forçar o clima. O aerossol que dispersa principalmente a radiação solar produz efeito de resfriamento, enquanto aquele que absorve a radiação solar produz efeito de aquecimento (Guleria; Kunial, 2019). De acordo com Ackerman et al. (2000) os aerossóis absorventes levam ao aquecimento da baixa atmosfera, por sua vez, alteram a umidade relativa e a estabilidade da baixa atmosfera e, assim, influenciam a formação de nuvens e seu tempo de vida.

A figura 8 apresenta a correlação entre BC acima de $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (eixo x) com a Emissividade Atmosférica (eixo y) representando os gráficos (a) 2017, (b) 2018 e (c) 2019. Os dados foram considerados no período noturno entre 18h00min e 05h30min, utilizando-se médias mensais no período noturno. Esse período representa as condições noturnas verificando insights sobre a influência do BC na Emissividade Atmosférica durante as horas em que a radiação solar não está presente.

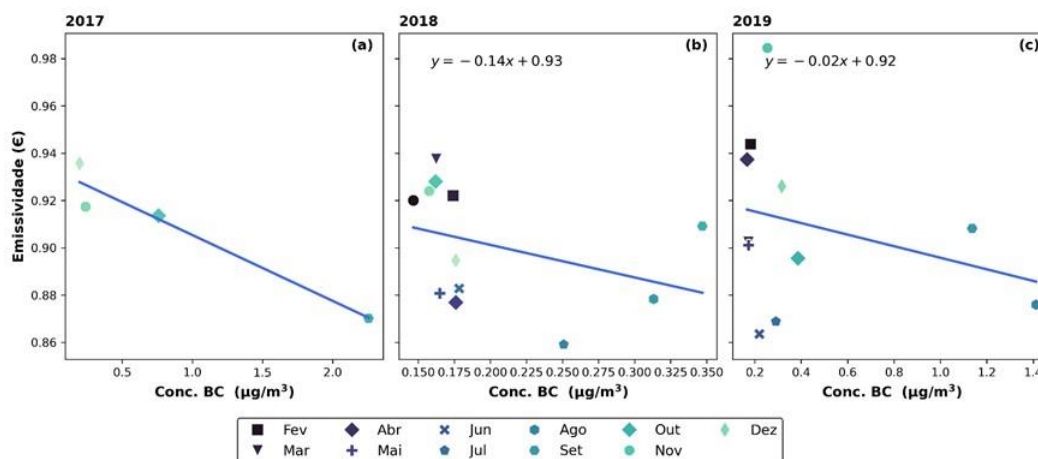


Figura 8. Correlação entre a concentração de *Black Carbon* Emissividade para todo o período estudado.

É importante observar que houve uma falta de dados para o ano de 2017, com medições disponíveis apenas para os meses de setembro a dezembro. Nos três gráficos correspondentes a

cada ano, é evidente que a partir de concentrações de BC superiores a $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, há uma notável redução na Emissividade. O declínio é evidente ao observar que a Emissividade Atmosférica, que

inicialmente estava em torno de 0,94 (admissional), diminui para valores abaixo de 0,88, nos anos de 2018 e 2019. A diminuição da Emissividade Atmosférica se dá principalmente nos meses de julho, agosto e setembro (período quente e seco). A análise dos gráficos sugere que as concentrações de BC acima de $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ influenciam de maneira notável a Emissividade. Isso indica que o aumento na concentração de aerossol pode ter um papel significativo na diminuição da Emissividade Atmosférica.

Um estudo conduzido por Mendonça (1996) em Santo Antônio do Leverger durante a estação seca de 1994, resultou em uma média diária de emissividade atmosférica de 0,85. Curado (2011) realizou uma estimativa da emissividade atmosférica no Pantanal Mato-Grossense no período de janeiro a setembro de 2008, obtendo uma média de 0,88 para a estação chuvosa e 0,82 para a estação seca. Por sua vez a análise de Silva et al. (2019) sobre o desempenho de diversos métodos de estimativa da emissividade atmosférica, incluindo o modelo de Brutsaert, na

região do Cerrado Campo Sujo, na baixada cuiabana, obtendo valores que variaram de 0,80 a 0,91 no ano de 2009. Outro estudo, conduzido por Me Mendonça (1996) em Santo Antônio do Leverger durante a estação seca de 1994, resultou em uma média diária de emissividade atmosférica de 0,85. Silva (2021) realizou estudo nos períodos seco e chuvoso do Pantanal e concluiu que nos meses chuvosos tiveram os maiores valores da emissividade atmosférica em comparação com os meses do período seco. Setembro registrou o menor valor da emissividade atmosférica.

Na figura 9 pode ser observada a correlação entre Concentrações de BC (eixo x) com Emissividade Atmosférica (eixo y) no mês de setembro de 2017 (a), este sendo o representativo do período quente e seco e de março de 2018 (b), sendo este um período quente e úmido. Foram calculadas as médias diárias dos trinta dias, dos dois meses em questão, correspondendo ao mesmo período estudado no gráfico anterior.

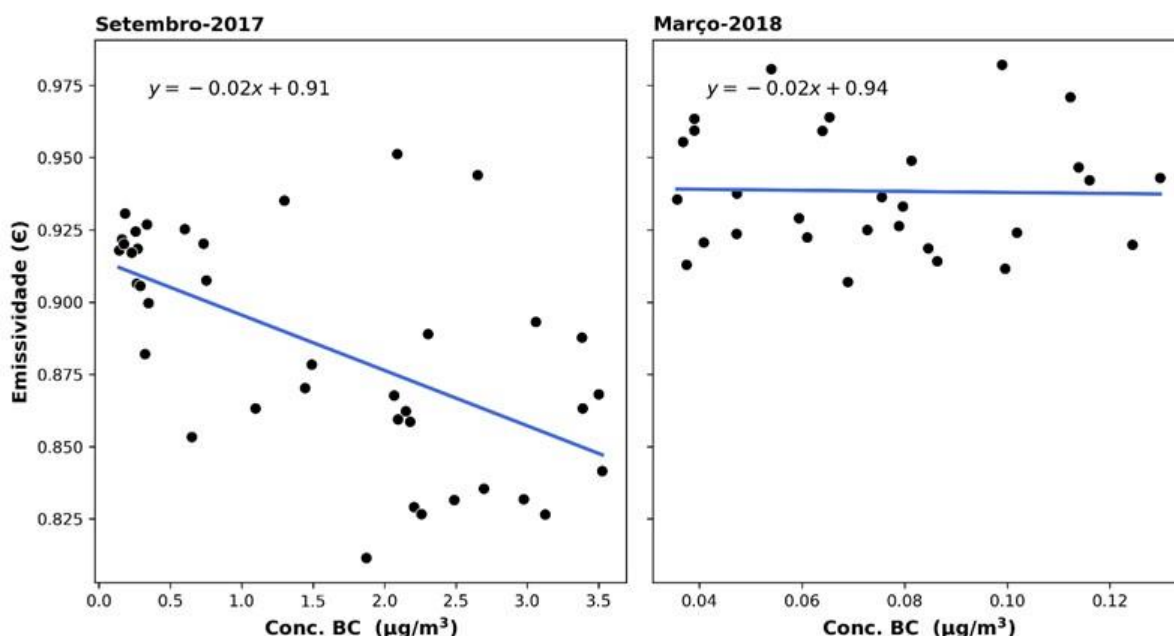


Figura 9. Relação entre a concentração de *Black Carbon* e a emissividade atmosférica no mês de setembro/2017 e março/2018.

Visto que as concentrações de BC são maiores no período seco, observa-se que no mês de março quando não se tem muita concentração do aerossol a Emissividade Atmosférica permanece estável em todos os níveis de concentrações. Já no mês de setembro, onde o BC tem sua maior taxa de concentração, observa-se que a emissividade decai

bastante principalmente a partir da concentração de $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Essa observação sugere que, em setembro, apesar das altas temperaturas no ecossistema, a Emissividade Atmosférica não aumenta como seria esperado, pelo contrário ela decai. Isso sendo um elemento crucial da influência do BC em relação a emissividade, sendo um fator

importante para o bloqueio da emissividade em quando o sistema está com altas concentrações do aerossol. O aumento da concentração de BC, causa um aquecimento nas camadas atmosféricas, já que as partículas são fortes absorvedoras da radiação solar. Esse aquecimento traz como consequência uma camada atmosférica mais estável e seca, pois a umidade disponível no ar se distribui entre as partículas, podendo causar a diminuição e evaporação da nuvem inibindo assim a precipitação (GRIMM et al., 2012; JIN et al., 2005; ANDREAE et al., 2004). Por conta do fator de redução da umidade e consequentemente das nuvens pelo aumento da concentração de *Black Carbon* a emissividade atmosférica é menor. Já no período chuvoso, com alto teor de umidade e baixa concentração de BC a emissividade é maior.

Variação da concentração de *Black Carbon* comparada com a Radiação Global, Radiação Líquida e na Emissividade Atmosférica

Essa seção dos resultados e discussão apresenta a análise da variação da concentração de BC em relação às variáveis Rg, Rn e Emissividade Atmosférica. Foi calculada a média mensal das concentrações de cada variável para cada mês, abrangendo o período de janeiro a dezembro ao longo dos três anos de estudo. Para as medições de Rg, o período diurno foi compreendido entre as 06h00min e 17h30min, no caso de Rn, todas as horas do dia foram consideradas, abrangendo tanto o período diurno quanto o noturno. Quanto à Emissividade Atmosférica, as medições foram concentradas no período noturno, das 18h00min às 05h30min.

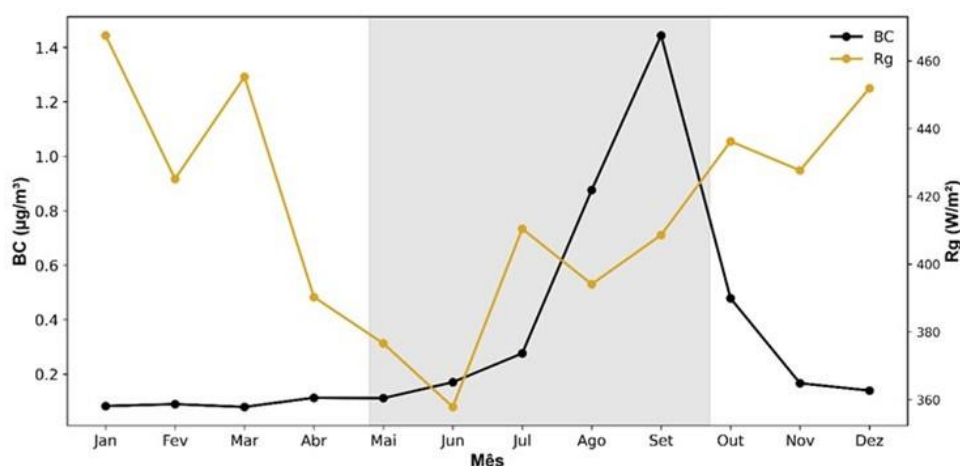


Figura 10. Variação da concentração de *Black Carbon* em relação a Radiação Global nos anos de 2017 a 2019.

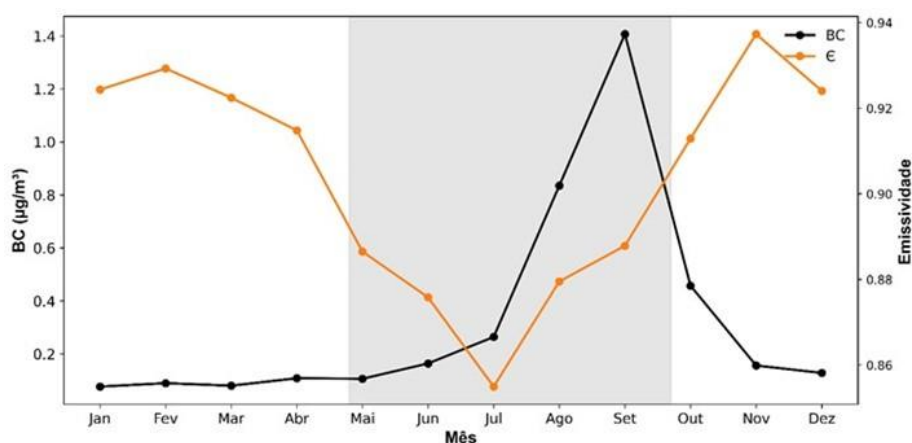


Figura 11. Variação da concentração de *Black Carbon* em relação a Radiação Líquida nos anos de 2017 a 2019. Fonte: Elaborada pelos autores.

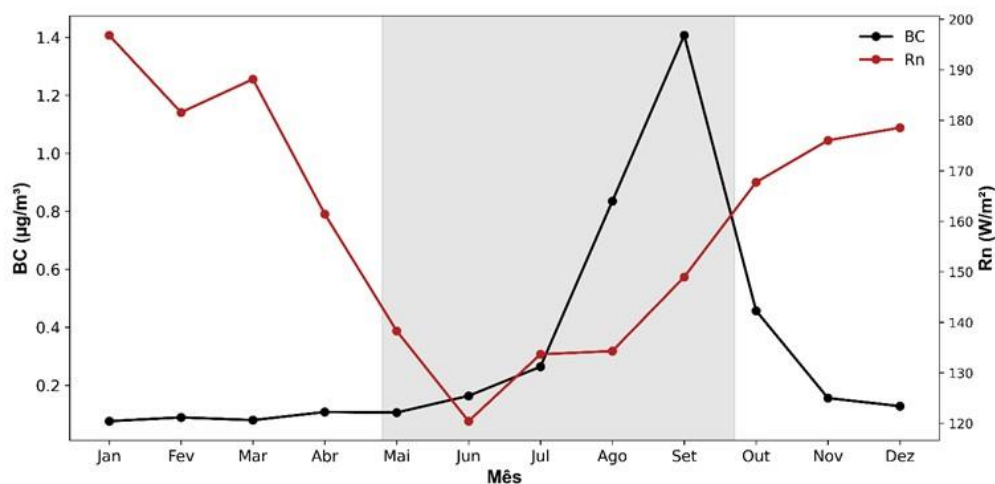


Figura 12. Variação da concentração de *Black Carbon* em relação a Emissividade Global nos anos de 2017 a 2019.

Observa-se que essas variáveis apresentam padrões de variação diferentes durante todo o período analisado. Quando o aerossol BC começa a ter concentrações mais elevadas, no período quente e seco, sendo realçado no gráfico por meio de um fundo mais cinza, esse aumento nas concentrações inicia em junho e atinge o pico em setembro, nota-se esta tendência nos três gráficos. Enquanto Rg e Rn, atingem o valor mínimo no mesmo período (Figura 10 e 11). Esse fenômeno também é influenciado pelo início do inverno na região e a inclinação do sol na América do Sul. Durante o inverno, o ângulo de incidência solar é menor, resultando em menor radiação solar direta e, portanto, menor Rg e Rn. No entanto, o aumento das concentrações de BC também tem um impacto significativo na interação entre a radiação solar e a atmosfera. O BC absorve a radiação solar e gera aquecimento nas camadas atmosféricas, o que, por sua vez, leva a uma camada atmosférica mais estável e seca. Isso ocorre porque a umidade disponível no ar é redistribuída entre as partículas de BC, reduzindo a umidade disponível para formar nuvens.

O resultado desse processo é uma diminuição na emissividade atmosférica, conforme observado na Figura 12. Durante o período quente e seco, a emissividade atmosférica é menor devido à presença do BC. Em contraste, no período chuvoso, caracterizado por um alto teor de umidade e baixa concentração de BC, a emissividade é maior. Isso pode ter como consequência a diminuição e evaporação de nuvens, inibindo a ocorrência de precipitação.

A presença de grandes concentrações de BC influencia não apenas a concentração de

partículas atmosféricas, mas também a interação entre radiação solar, umidade e estabilidade atmosférica, o que, por sua vez, afeta a emissividade e, consequentemente, os padrões de precipitação na região estudada.

Uma possível explicação para esses resultados é o fato de que os aerossóis estão fortemente associados ao ciclo hidrológico, funcionam como núcleo de condensação de nuvens (NCN), podem modificar as suas propriedades microfísicas, suas propriedades radiativas, a cobertura total das nuvens e o seu ciclo de vida (Artaxo et al., 2009; Forster et al., 2007; Guleria; Kunial, 2019).

Estudos desenvolvidos por Procopio (2003) relatam que a radiação solar ao atravessar a atmosfera sofre uma série de perturbações causadas por partículas de aerossóis e gases ao longo de seu caminho ótico, definindo seu espectro e sua intensidade no nível do solo. Artaxo et al. (2002) afirma que a composição química da atmosfera amazônica sofre grandes mudanças na época da seca, devido às emissões de gases traço e partículas de aerossóis provenientes de queimadas de pastagens e floresta, gerando importantes implicações em nível local, regional e global. A maior fonte de aerossóis para a atmosfera na América do Sul são as emissões por queimadas de florestas e cerrados, que ocorrem principalmente na estação seca na região amazônica. As florestas e os cerrados brasileiros são regiões onde historicamente ocorrem queima de biomassa em função do processo natural do uso do solo pelos agricultores e do uso da lenha como combustível, mas o número de queimadas tem aumentado

significativamente nos últimos anos (ARTACHO, 2006)

A absorção da radiação pelos aerossóis resulta em forçamento positivo no topo da atmosfera, particularmente nas regiões com alta refletância superficial e, as florestas tropicais são de médias refletâncias, portanto, produz um efeito de aquecimento líquido na atmosfera. Os aerossóis absorventes levam ao aquecimento da baixa atmosfera, por sua vez, alteram a umidade relativa e a estabilidade da baixa atmosfera e, assim, influenciam a formação de nuvens e seu tempo de vida.

Conclusões

A prática de uso do fogo para limpeza de pastagens, preparação de áreas agrícolas e expansão das atividades pecuárias é uma das principais causas dos incêndios no Pantanal. Isso é evidenciado pelo aumento significativo de focos de queimadas durante a estação seca.

As concentrações de BC são mais elevadas durante os meses do período quente e seco no Pantanal, particularmente em setembro. Essa tendência está diretamente relacionada às queimadas que ocorrem nesse período, já que o BC é gerado a partir da queima de biomassa. No período chuvoso, as concentrações de BC são significativamente mais baixas.

A análise do Co-espectro sugere que ao longo desses 3 anos, eventos específicos ou padrões sazonais desempenharam um papel importante na intensificação da influência mútua entre os dados, sendo evidenciada a influência do BC nas variáveis micrometeorológicas numa periodicidade em torno de 1 ano. Essa relação significativa entre as séries de dados é crucial para entender as dinâmicas complexas que ocorrem na atmosfera do Pantanal. Isto reforça a complexidade das relações entre BC e as variáveis meteorológicas no Pantanal e destaca a necessidade de um estudo mais aprofundado para entender completamente os mecanismos subjacentes a essas interações e seus impactos no clima e no meio ambiente da região.

Quando as concentrações de BC atingem valores acima de $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ocorre uma redução significativa na R_g e na R_n , principalmente durante os meses de maior concentração de BC (julho, agosto e setembro). Isso ocorre devido à capacidade do BC de absorver intensamente a radiação solar, resultando em um aquecimento da atmosfera e redução da quantidade de radiação solar que atinge a superfície. Durante o período de maior concentração de BC, a Emissividade

Atmosférica tende a diminuir, indicando uma atmosfera mais estável e seca.

As concentrações de BC aumentam durante a estação seca, contribuindo para o bloqueio e absorção da radiação solar direta e influenciando a estabilidade atmosférica. Isso pode afetar os padrões de precipitação na região e tem implicações para o clima local e regional. Esses resultados destacam a importância de considerar o BC como um componente relevante nas discussões sobre mudanças climáticas e interações atmosféricas no Pantanal.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Mestrado do primeiro autor (código de financiamento 001) e ao Instituto Nacional de Áreas Úmidas (INAU/INPP) pelo apoio através dos projetos: Aspectos Ecofisiológicos na Dinâmica de Trocas Líquidas de CO_2 (NEE), CH_4 , Evapotranspiração e de Energia no Pantanal Matogrossense; Medidas de Trocas Líquidas de CO_2 (NEE), CH_4 , Evapotranspiração e de Energia no Pantanal Matogrossense; Aspectos Alométricos na Dinâmica de Trocas Líquidas de CO_2 (NEE), CH_4 , Evapotranspiração e de Energia no Pantanal Matogrossense.

Financiamento

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

Disponibilização de dados

Os dados do estudo são disponibilizados pelo Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental em parceria Base Avançadas de Pesquisas do Pantanal (BAPP) – Universidade Federal de Mato Grosso.

Conflito de Interesse

Os autores declaram que não existem conflitos de interesse com outros pesquisadores ou instituições.

Referências

Ackerman, A. S., Toon, O. B., Taylor, J. P., Johnson, D. W., Hobbs, P. V., & Ferek, R. J. (2000). Effects of aerosols on cloud albedo: Evaluation of Twomey's parameterization of cloud susceptibility using measurements of ship

- tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(16), 2684-2695. [https://doi.org/10.1175/15200469\(2000\)057<2684:EOAOCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200469(2000)057<2684:EOAOCA>2.0.CO;2)
- Andreae, M. O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A. A., Frank, G. P., Longo, K. M., & Silva-Dias, M. A. F. (2004). Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, 303(5662), 1337-1342.
- Artaxo, P., Oliveira, P., Lara, L. L., Pauliquevis, T. M., Rizzo, L. V., Pires Junior, F. C., Paixão, M. A., Longo, K. M., Freitas, S. R., & Correia, A. L. (2006). Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21(3a), 168-189. Disponível em: http://ftp.lfa.if.usp.br/ftp/public/Publications_Paulo_Artaxo/2006/Efeitos_climaticos_aerossóis_de_queimadas_e_biogenicos_Rev_Bras_Meteorologia_Dezembro_2006_Paulo_Artaxo.pdf. Acesso em: 03 de março de 2023.
- Artaxo, P., Rizzo, L. V., Paixão, M., Lucca, S., Oliveira, P. H., Lara, L. L., Wiedemann, K. T., Andreae, M. O., Holben, B., & Schafer, J. (2009). Aerosol particles in Amazonia: Their composition, role in the radiation balance, cloud formation, and nutrient cycles. *Amazonia and Global Change*, 233-250. <http://dx.doi.org/10.1029/2008gm000778>
- Bibi, S., Alam, K., Chishtie, F., Bibi, H., & Rahman, S. (2017). Temporal variation of black carbon concentration using aethalometer observations and its relationships with meteorological variables in Karachi, Pakistan. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 157-158, 67-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.017>
- Biudes, M. S., Vourlitis, G. L., Machado, N. G., Arruda, P. H. Z., Neves, G. A. R., Lobo, F. A., Neale, C. M. U., & Nogueira, J. S. (2015). Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 202, 112-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.008>
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (1990). Resolução CONAMA n. 3 de 28 de junho de 1990. Diário Oficial da União. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. Acesso em: 19 de junho de 2023.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2007). *Biodiversidade do Cerrado e Pantanal: Áreas e ações prioritárias para conservação* (Série Biodiversidade, 17). Brasília: Ministério do Meio Ambiente.
- Capp, E., & Nienov, O. H. (2020). Bioestatística quantitativa aplicada. Porto Alegre: UFRGS. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213489/001117628.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 de junho de 2023.
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley, J. A., Hansen, J. E., & Hofmann, D. J. (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 255(5043), 423-430. <http://dx.doi.org/10.1126/science.255.5043.423>
- Costa, A. A., Pauliquevis Júnior, T. M., Souza, E. P., Martins, J. A., Yamasoe, M., Andrade, M. F., & Barbosa, J. H. M. (2006). Aerossóis atmosféricos e nuvens (6ª ed.). Rio de Janeiro: Primeiro Relatório de Avaliação Nacional.
- Couto, C. M. D. (2020). Radiação de onda longa atmosférica na superfície em regiões subúmida e semiárida da Bahia (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Disponível em: https://www.ufrb.edu.br/pgea/images/Teses/Cosme_Mateus_Dias_Couto.pdf. Acesso em: 02 de outubro de 2023.
- Curado, L. F. A. (2011). Estimativa sazonal da emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso.
- Duarte, L. G. (2020). Análise sazonal e interanual do balanço de energia no Pantanal Mato-Grossense (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso.
- Fiocruz. (2020). Incêndios florestais no Pantanal 2020. Cuiabá: Ministério da Saúde.
- FLORA E FUNGA DO BRASIL. (2023). Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Acesso: 17 de maio de 2023.
- Jin, M., Shepherd, J. M., & King, M. D. (2005). Urban aerosols and their variations with clouds and rainfall: A case study for New York and Houston. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110*(D10).
- Li, W., Wang, Y., Yi, Z., Guo, B., Chen, W., Che, H., & Zhang, X. (2024). Evaluation of MERRA-2 and CAMS reanalysis for black carbon aerosol in China. *Environmental Pollution*, 343, 123182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123182>
- Martins, J. A. (2006). Efeito dos núcleos de condensação na formação de nuvens e o desenvolvimento da precipitação na região

- amazônica durante a estação seca (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo.
- Palácios, R. S., Romera, K. S., Curado, L. F. A., Banga, N. M., Rothmund, L. D., Sallo, F. D. S., Moraes, D., Santos, A. C. A., Moraes, T. J., Moraes, F. G., Landulfo, E., Franco, M. A. M., Kuhnen, I. A., Marques, J. B., Nogueira, J. S., & Júnior, L. C. G. D. V. (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>
- Penatti, N. C. (2014). Natasha Costa Penatti (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo.
- Perin, A. L. (2009). Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Pinto, A. B. L. (2013). Pecuária bovina e os impactos do desmatamento e das queimadas no Pantanal Norte / MT. Universidade Federal de Mato Grosso. 14º EGAU (Encontro de Geógrafos da América Latina).
- Ramachandran, S., & Kedia, S. (2011). Aerosol radiative effects over an urban location and a remote site in western India: Seasonal SEMA. (2023). I.N. 04/2023 SEMA/MT - SIMCAR e áreas consolidadas. Cuiabá: Secretaria de Estado de Meio Ambiente.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- 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(3), 1261-1275.
- Silva, H. J. A. (2021). *Influência da variação sazonal da concentração de Black Carbon na emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso.
- Silva, J. B., Gaio, D. C., Curado, L. F. A., Nogueira, J. S., Valle Júnior, L. C. G., & Rodrigues, T. R. (2019). Evaluation of methods for estimating atmospheric emissivity in Mato-Grossense Cerrado. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 14(3), 1. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2288>
- Vallejo, L. R. (2010). *A dimensão socioambiental do Cerrado brasileiro* (60 p.). https://www.academia.edu/38229762/Cap_Livro_Cerrado_pdf
- variability. *Atmospheric Environment*, 45(39), 7415-7422.
- Rayl, J., Brownson, J. R. S., & Young, G. (2012). Climate-regime cospectrum analysis: Shortwave solar irradiance for regionally spaced locales. In World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conference (pp. 1957-1962
- Rodrigues, N., Silva, L., Oliveira, A., Pinillos, A. C., & Souza, C. (2014). Análise da distribuição espaço-temporal e quantificação de focos de calor, na área fisiográfica do Pantanal Matogrossense. *Enciclopédia Biosfera*, 10(19), 295.
- Santos, A. C. A. (2018). *Absorção da radiação solar por partículas de aerossóis no Pantanal Mato-grossense* (Tese de doutorado). Universidade Federal de Mato Grosso.
- Satheesh, S. K., & Ramanathan, V. (2000). Large differences in tropical aerosol forcing at the top of the atmosphere and Earth's surface. *Nature*, 405(6782), 60-63. <https://doi.org/10.1038/35011039>
- Viganó, H. H. G., Souza, C. C., Cristaldo, M. F., Reis Neto, J. F., & Jesus, L. (2018). Incêndios no Pantanal de Corumbá, MS: modelagem e previsão a partir das técnicas de análise multivariada. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 13(5), 1-13.
- Wolf, A., & Laca, E. A. (no prelo). Cospectral analysis of high frequency signal loss in eddy covariance measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Zhang, H., Zhu, S., Zhao, S., & Wei, X. (2020). Establishment of high-resolution aerosol parameterization and its influence on radiation calculations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 243, 106802. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106802>