

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DO *BLACK CARBON* NA
TEMPERATURA DO AR E UMIDADE RELATIVA DO
AR DO PANTANAL MATO-GROSSENSE**

ANDRÉ MATHEUS DE SOUZA LIMA

**PROF. DR. LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO
ORIENTADOR**

**Cuiabá-MT
Fevereiro de 2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DO *BLACK CARBON* NA
TEMPERATURA DO AR E UMIDADE RELATIVA DO
AR DO PANTANAL MATO-GROSSENSE**

ANDRÉ MATHEUS DE SOUZA LIMA

*Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Física Ambiental
da Universidade Federal de Mato
Grosso, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Física
Ambiental.*

**PROF. DR. LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO
ORIENTADOR**

**Cuiabá, MT
Fevereiro de 2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L732i Lima, André Matheus de Souza.
Influência do Black Carbon na Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar do Pantanal Mato-grossense [recurso eletrônico] : Catalogação automática de teses e dissertações na UFMT / André Matheus de Souza Lima. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 41 f., il. color., pdf). -- 2024.

Orientador: Leone Francisco Amorim Curado.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2024.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.
Inclui bibliografia.

1. Queimadas. 2. Aerossóis Antropogênicos. 3. Informação Mútua. 4. Pantanal. I. Curado, Leone Francisco Amorim, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Influência do Black Carbon na Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar do Pantanal Mato-grossense

AUTOR: MESTRANDO André Matheus de Souza Lima

Dissertação defendida e aprovada em **07 de fevereiro de 2024**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Prof. Dr. LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO (Presidente Banca / **ORIENTADOR**)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

2. Prof. Dr. JOÃO BASSO MARQUES (Membro Interno)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

3. Prof. Dr. JONATHAN WILLIAN ZANGESKI NOVAIS (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: Universidade de Cuiabá

Cuiabá, 07/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 07/02/2024, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 07/02/2024, às 17:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO BASSO MARQUES**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 08/02/2024, às 00:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonathan Willian Zangeski Novais, Usuário Externo**, em 08/02/2024, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6593102** e o código CRC **EE163346**.

Referência: Processo nº 23108.006769/2024-14

SEI nº 6593102

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus; aos meus pais Auricio e Cláudia, ao meu irmão Anderson, que sempre foi um grande companheiro em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

- A Deus
- Ao Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado, pela orientação, pelo incentivo, confiança, empenho, dedicação e paciência, que contribuíram de forma única e singular que possibilitaram a produção deste trabalho.
- A Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo por sua ajuda em conhecimentos dada no passado, presente e sei que no futuro caso necessário não só para mim más para todos que necessitarem de seus conhecimentos serão atendidos pela grande pessoa que esta é.
- Aos meus pais Auricio Leite de Lima, e Cláudia Gomes de Souza. Por todo apoio e carinho ao longo dessa jornada. E meu irmão Anderson Américo de Souza Lima por toda ajuda sempre que necessário.
- Aos meus amigos(as) Amanda, Fernando, Haline, Nivalda, Luiz, Adriano, Ian, Lucélio, Thamiris, Rafaely, Marlon e Lucas.
- A todos os colegas do programa de pós-graduação que ajudaram em muito, os quais se tornaram grandes amigos.
- A todo o corpo docente e técnico responsável por auxiliar no aprendizado obtido ao longo do mestrado.
- Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro durante a realização desta pesquisa.

EPÍGRAFES, FRASES OU PENSAMENTOS

***“O começo de todas as ciências são o espanto de
as coisas serem como são.”***

Aristóteles

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 PANTANAL	2
2.2 AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS.....	3
2.3 <i>BLACK-CARBON</i>	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	5
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	5
3.2. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA	6
3.2.1. Temperatura e Umidade Relativa do Ar	6
3.2.2. Concentração do <i>Black Carbon</i>	7
3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	8
3.3.1. Informação Mútua	8
3.3.2. Kruskal-Wallis e Dunn	9
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DE MICROCLIMA (TEMPERATURA DO AR)	10
4.1.2. CARACTERIZAÇÃO DE MICROCLIMA (UMIDADE RELATIVA DO AR).....	12
4.1.3. PADRÕES NA CONCENTRAÇÃO DE <i>BLACK CARBON</i> E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE <i>BLACK CARBON</i> EM 880NM.....	14
4.1.3.1. Concentração de <i>Black Carbon</i>	14
4.1.3.2. Coeficiente de Absorção de <i>Black Carbon</i> em 880nm.....	16
4.2. TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR, CONCENTRAÇÃO DE <i>BLACK CARBON</i> E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE <i>BLACK CARBON</i> EM 880NM, PRECIPITAÇÃO E FOCOS DE QUEIMADAS	18
4.3. INFORMAÇÃO MÚTUA ENTRE AS VARIÁVEIS ANALISADAS	22
4.4. INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA DE KRUSKALL WALLIS E DUNN PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS	23
5. CONCLUSÃO	25
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo, Base Avançada do Pantanal – Baía das Pedras, pertencente a Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN SESC.....	6
Figura 2. Média horária da temperatura do ar do Pantanal mato-grossense de 2017 a 2019.....	11
Figura 3. Média horária da umidade relativa do ar do Pantanal mato-grossense de 2017 a 2019.....	13
Figura 4. Relação da caracterização da concentração de <i>Black Carbon</i> no PantanalMatogrossense para os anos de 2017 à 2019.....	15
Figura 5. Caracterização do coeficiente de absorção de <i>Black Carbon</i> em 880nm no Pantanal para os anos de 2017 2018 e 2018.....	17
Figura 6. Temperatura e umidade relativa do ar (a) , coeficiente de absorção de <i>Black Carbon</i> em 880nm e Concentração de <i>Black Carbon</i> (b) , precipitação e focos de queimadas em (c) , de janeiro de 2017 a dezembro de 2019 separados em período seco e chuvoso.....	19
Figura 7. Informação Mútua entre as variáveis de temperatura do ar e concentração de <i>Black Carbon</i> em a , Informação Mútua entre coeficiente de absorção de <i>Black Carbon</i> em 880nm e umidade relativa em b , Informação Mútua entre as variáveis de umidade relativa ar e concentração de <i>Black Carbon</i> em c , Informação Mútua entre coeficiente de absorção de <i>Black Carbon</i> em 880nm e umidade relativa do ar em d ...	22
Figura 8. Teste de Kruskal-Wallis e teste de Dunn para as variáveis temperatura e umidade relativa do ar, coeficiente de absorção de <i>Black Carbon</i> em 880nm e concentração de <i>Black Carbon</i> . para os anos de 2017, 2018 e 2019.....	24

RESUMO

LIMA, A. M. S. **INFLUÊNCIA DO BLACK CARBON NA TEMPERATURA DO AR E UMIDADE RELATIVA DO AR DO PANTANAL MATO-GROSSENSE.** Cuiabá, 2024, 41f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

Entender como o Black Carbon (BC) afeta a atmosfera e suas consequências nas variáveis meteorológicas, como a temperatura do ar e umidade relativa do ar, é fundamental para avaliar as variações dessas variáveis diante projeções que envolvem mudanças climáticas globais. Neste estudo, foi utilizada a Informação Mútua para verificação da dependência existente entre variáveis aleatórias, possibilitando se observar se há certa sensibilidade da temperatura do ar e umidade relativa do ar a presença de partículas de BC na região, através de dados coletados na Base de Pesquisas Avançadas do Pantanal da UFMT entre 2017 e 2019. É mostrado nos resultados o aumento das concentrações de BC que impactam diretamente a temperatura do ar e umidade relativa do ar e suas interações atmosféricas, sendo evidenciados tais aumentos a partir testes de Kruskal-Wallis e Dunn, para verificação da diferença existente entre as quatro variáveis utilizadas nesse estudo, e o teste de Dunn para comparação dos três anos estudados. O acúmulo de partículas de BC resulta no processo responsável por aquecer o ar circundante, resultando dificuldades para existência de espécies adaptadas à ambientes úmidos. Durante a estação seca a região, apresentando baixos índices de precipitação, agravando condições atmosféricas que se intensificam devido ações antrópicas recorrentes para os três anos estudados. Tanto a temperatura do ar quanto a umidade relativa apresentaram níveis mais sensíveis a essas condições. Portanto, as mudanças na temperatura do ar e na umidade relativa não podem ser negligenciadas, devendo ser analisadas, onde suas alterações podem afetar diretamente o bioma pantaneiro.

Palavras-chave: Queimadas, Aerossóis Antropogênicos, Informação Mútua, Pantanal.

ABSTRACT

LIMA, A. M. S. **INFLUENCE OF BLACK CARBON ON THE AIR TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY OF THE PANTANAL MATO-GROSSENSE**. Cuiabá, 2024, 41f. Dissertation (Masters in Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

Understanding how Black Carbon (BC) affects the atmosphere and its consequences on meteorological variables, such as air temperature and relative humidity, is essential for evaluating variations in these variables in the face of projections involving global climate change. In this study, Mutual Information was used to verify the existing dependence between random variables, allowing the observation of whether there is a certain sensitivity of air temperature and relative humidity to the presence of BC particles in the region, based on data collected at the Pantanal Advanced Research Base of UFMT between 2017 and 2019. The results demonstrate the increase in BC concentrations directly impacting air temperature and relative humidity, as well as their atmospheric interactions. These increases are evidenced through Kruskal-Wallis and Dunn tests, to verify the differences between the four variables used in this study, and the Dunn test for the comparison of the three years studied. The accumulation of BC particles leads to a process responsible for warming the surrounding air, resulting in difficulties for species adapted to humid environments. During the dry season in the region, characterized by low precipitation levels, atmospheric conditions worsen, intensifying due to recurrent anthropogenic actions over the three years studied. Both air temperature and relative humidity showed higher sensitivity to these conditions. Therefore, changes in air temperature and relative humidity cannot be neglected and should be analyzed, as their alterations can directly affect the Pantanal biome.

Keywords: Burns, Anthropogenic Aerosols, Mutual Information, Wetland.

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

Nas últimas décadas, houve um reconhecimento crescente de que os aerossóis atmosféricos desempenham um papel fundamental na composição da atmosfera, influenciando significativamente o balanço de radiação tanto em nível regional quanto global, e consequentemente, afetando o clima do planeta Terra (Tiwari et al., 2020). Os aerossóis atmosféricos são partículas sólidas e líquidas suspensas na atmosfera, têm um papel fundamental no meio ambiente e nas mudanças climáticas globais, pois absorvem e dispersam a radiação solar incidente (Chen et al., 2021). Além disso, exercem influência sobre as condições climáticas, atuando como núcleos de condensação no ciclo da água, o que afeta a precipitação (Liu et al., 2020). As partículas de aerossol podem comprometer a qualidade do ar e reduzir a visibilidade, acarretando efeitos prejudiciais para a saúde humana. Particularmente, partículas finas podem ser inaladas pelo sistema respiratório, aumentando o risco de doenças respiratórias (Tiwari et al., 2023).

O *Black Carbon (BC)* é um tipo de aerossol carbonáceo provenientes de fontes antropogênicas que englobam principalmente as emissões veiculares, especialmente provenientes de motores a diesel, aquecimento residencial, queima de biomassa e atividades industriais (Zhang and Wang, 2011). Estudos apontam (Dumka et al., 2018; Magalhães, 2017) que a parcela das emissões atmosféricas de *BC* oriundas de combustíveis fósseis, biocombustíveis e queima de biomassa a céu aberto, que inclui incêndios florestais e queima de resíduos agrícolas, foi estimada em cerca de 38%, 20% e 42%, respectivamente. Ele se encontra na atmosfera na forma de partículas primárias, sendo um indicador útil das fontes de combustão (Singh et al., 2018).

O *BC* possui a capacidade de absorver intensamente a radiação solar em vários comprimentos de ondas (faixas), desde o visível ao infravermelho. Isso resulta em um aumento da quantidade de energia da radiação solar absorvida no sistema terra-atmosfera. Devido a essa capacidade de absorção de radiação solar pelos aerossóis *BC*, eles são considerados um fator relevante no contexto do aquecimento global. Essa presença de aerossóis na atmosfera é uma das incertezas graves no cálculo do balanço global de radiação, conforme indicado pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre

Mudanças Climáticas) em 2013 (Palácios et al., 2022).

Este estudo visa observar as possíveis influências resultadas pela presença do *Black Carbon*, nas médias da temperatura do ar e umidade relativa do ar no Pantanal, servindo como material de apoio para realização de novos estudos sobre uma temática envolta da conservação do bioma Pantanal.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PANTANAL

O Pantanal é uma vasta região úmida tropical, abrangendo uma extensão de 140.000 km². Está situado no coração da América do Sul, no oeste do Brasil, integra a Bacia do Alto Rio Paraguai (UPRB) numa faixa de latitude entre 15°30' e 22°30' sul, e longitude de 54°45' a 58°30' oeste. A UPRB cobre uma área de 361.666 km², na qual as terras se elevam de 200 a 1.200 metros acima do nível do mar, configurando planaltos, e as muralhas situadas entre 80 e 150 metros, formando uma barreira de inundação conhecida como Pantanal. Esta última abrange uma área de 138.183 km², representando aproximadamente 38% da Bacia. A biodiversidade do Pantanal é influenciada pelos biomas circundantes, sendo o cerrado, que engloba os planaltos a leste, a Amazônia ao norte, a Mata Atlântica a sudeste, representado por florestas semidecíduas e caducifólias, e o chaco a sudoeste (Curado et al., 2011).

O Pantanal tem uma precipitação anual média de 1.400 mm, variando entre 800 e 1.600 mm, em alguns anos, as chuvas são sazonais ocorrem entre outubro e março, mas com diferenças entre as regiões norte e sul (Guimarães et al., 2018). A interação entre declividade, solo, água, vegetação e fauna distingue as planícies pantaneiras dos planaltos circundantes. As áreas altas recebem anualmente mais de 1.200 mm de precipitação, gerando uma rápida resposta nas bacias de drenagem. Por outro lado, as planícies alagam devido à sua capacidade limitada de escoamento, formando pequenos lagos temporários e inundando lagoas permanentes. Durante a vazante, a água retida evapora ou infiltra no solo, sem voltar aos leitos dos rios. Durante períodos de cheia, o fluxo de água se move lentamente por depressões chamadas "corixos" ou ao longo de caminhos de águas rasas chamados "vazantes". A evaporação da água do solo supera a precipitação, fazendo do Pantanal uma grande "janela" de evaporação. A

retenção de água nas planícies varia de 30% a 60%, resultando no caráter alagadiço do Pantanal (Alho Silva, 2012).

A principal atividade econômica na região é a pecuária, tradicionalmente conduzida de maneira extensiva devido à abundância de pastagens naturais. Esse cenário propiciou o estabelecimento de fazendas voltadas para a criação de gado desde os tempos coloniais. Além da pecuária, a rica biodiversidade do Pantanal possibilita a identificação de diversos sítios Ramsar pela UNESCO, conferindo-lhe a distinção de Patrimônio Mundial Cultural e Natural. Adicionalmente, o Pantanal possui o reconhecimento nacional de Patrimônio Nacional Brasileiro, conforme estabelecido pelo artigo 225, §4º, da Constituição Federal de 1988 (Pompeu and Vilpoux, 2023).

O avanço do agronegócio tem sido o principal motor do aumento do desmatamento no Pantanal, com a pecuária se destacando como a atividade econômica central na região. Adicionalmente, a intensificação das pastagens extensivas, abrigando mais de 3,8 milhões de cabeças de gado, e a expansão do cultivo de grãos representam uma ameaça iminente à vegetação nativa e à biodiversidade desse bioma (Bergier et al., 2019; Lucas et al., 2023). Embora o fogo seja parte da dinâmica natural do ecossistema, os incêndios descontrolados são de origem humana, ligados ao desmatamento e práticas inadequadas. A seca aumentou o risco de incêndios, levando a incêndios florestais devastadores, inclusive durante a estação chuvosa. Em 2020, houve um aumento alarmante nos focos de calor, resultando em incêndios iniciados pela atividade humana.

2.2 AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS

Desde a década de 70, a ciência dos aerossóis evoluiu consideravelmente, tornando-se uma componente dinâmica no campo científico e tecnológico. Avanços foram alcançados, possibilitando a compreensão da atmosfera. O termo "aerossol" refere-se a uma mistura de partículas sólidas ou líquidas que estão suspensas em um gás. Elas variam em tamanho, sendo menores que 100 micrômetros (μm) (Alves, 2005). O efeito climático dos aerossóis atmosféricos varia significativamente no espaço e ao longo do tempo, sendo influenciado pela origem das emissões, pela composição química, pelas mudanças que ocorrem na atmosfera e pela meteorologia

regional (Tiwari et al., 2023).

A atmosfera contém aerossóis provenientes de fontes tanto naturais, como o sal marinho e a poeira do deserto, quanto fontes causadas pela atividade humana, como as emissões industriais e os gases de escape dos veículos, além da queima de biomassa, processos esses que resultam na produção aerossóis e o *Black Carbon* objeto deste estudo. Quando as condições meteorológicas são favoráveis, esses aerossóis são elevados na atmosfera e transportados por longas distâncias de uma região para outra antes de serem depositados através de processos de deposição úmida ou seca (Tiwari et al., 2020).

2.3 BLACK CARBON

O *Black Carbon (BC)*, entre os aerossóis de carbono, ganhou destaque significativo no contexto das mudanças climáticas atuais. Isso se deve à sua notável habilidade de absorver radiação de ondas curtas, exercendo influência sobre a qualidade do ar e o clima em níveis que abrangem desde o local até escalas regional e global. O *BC* é uma fração de partículas finas que absorve eficientemente toda a gama de comprimentos de onda da radiação solar (Venkatraman et al., 2021). É gerado através da queima incompleta de substâncias que contêm hidrocarbonetos, tais como combustíveis fósseis, biocombustíveis e biomassa (Zhang and Wang, 2011).

A presença de aerossóis de *Black Carbon (BC)* na atmosfera tem experimentado um rápido aumento, resultado direto da utilização humana de carvão, petróleo e outros combustíveis fósseis, bem como da queima de biomassa e cultivos agrícolas, juntamente com as emissões dos escapamentos veiculares. Esse crescimento na concentração do *BC* começou durante a Revolução Industrial. Em uma análise abrangente realizada por Bond et al. (2004), as emissões globais de aerossóis de *BC* foram minuciosamente estudadas, e um valor estimado de aproximadamente 8,0 teragramas de carbono (Tg C) por ano foi calculado.

Os aerossóis de *Black Carbon (BC)* exercem influência no clima de três maneiras distintas. Em primeiro lugar, são capazes de absorver a radiação solar e infravermelha de forma direta, desequilibrando a energia no sistema terra-atmosfera e exercendo um impacto direto no clima. Em segundo lugar, esses aerossóis podem se

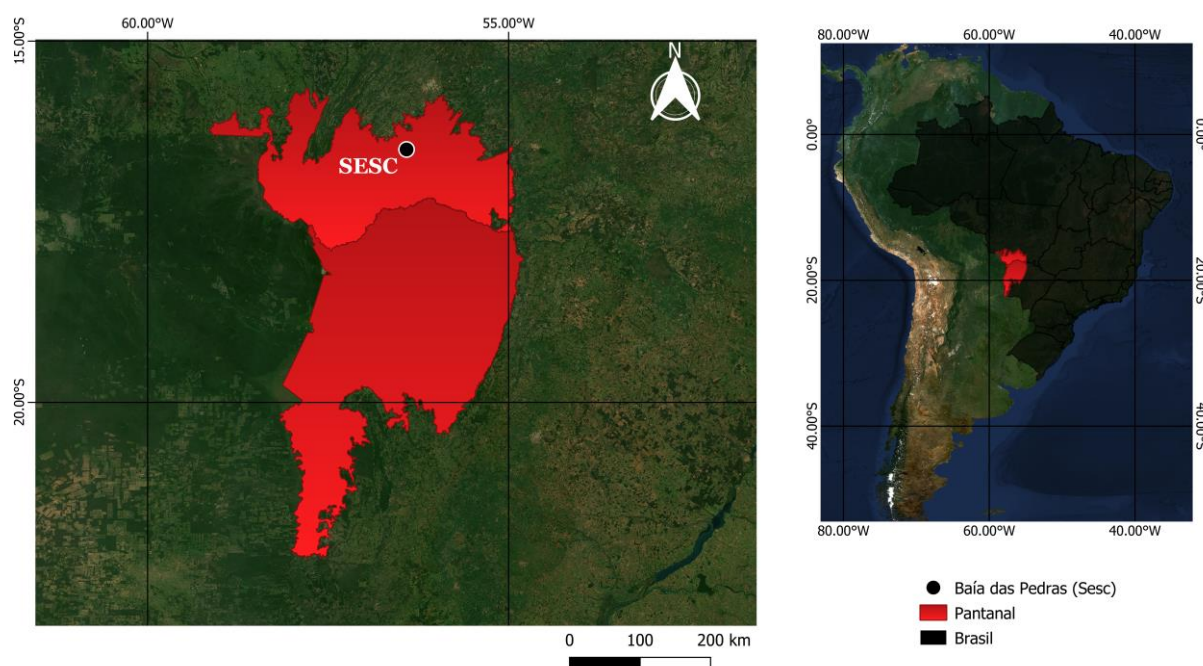
mesclar com sulfato, carbono orgânico e outros aerossóis solúveis em água, transformando-se em núcleos de condensação para nuvens ou agindo diretamente como núcleos de gelo. Esse processo altera as propriedades microfísicas e radioativas, bem como o tempo de vida das nuvens, afetando indiretamente o sistema climático. Por fim, quando presentes em uma camada de nuvens, os aerossóis *BC* podem absorver a radiação solar, aquecendo o ar na camada das nuvens. Esse aquecimento direto resulta na evaporação e subsequente redução das nuvens, sendo conhecido como efeito semidireto dos aerossóis *BC* (Zhang and Wang, 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada na Base Avançada de Pesquisas do Pantanal (BAPP) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), no Parque SESC Baía das Pedras em Porto Cercado, Poconé- MT. Esta área é composta substancialmente pela vegetação conhecida popularmente como “pombeiro” (*Combretum laxum*), um grande arbusto abundante em solos argilosos.

O clima da região, segundo a classificação climática de Koppen, é do tipo “Aw”, isto é, tropical com estação seca de inverno, com duas estações bem definidas, a seca entre maio e setembro e a chuvosa entre outubro e abril. A precipitação média anual da região é de 1400 mm e a temperatura média anual fica em torno de 26 °C (Alvares et al., 2013; Angelini et al., 2017).



Fonte: Autor.

Figura 1. Área de estudo, Base Avançada do Pantanal – Baía das Pedras, pertencente a Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN SESC.

3.2. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

3.2.1. Temperatura e Umidade Relativa do Ar

Neste trabalho foram utilizados dados de Temperatura do ar (°C) e Umidade Relativa do ar (%) medidos in situ. O sensor meteorológico utilizado para realizar essas medidas foi um Termohigrômetro modelo HMP 45 C, Vaisala, Inc., Helsinki, Finland. Esse instrumento, contém um detector de temperatura de resistência de platina (PRT) e um sensor capacitivo para medir a umidade relativa, onde mede a umidade relativa (UR) na faixa de 0 a 100% e a temperatura do ar (Ta) na faixa de -40 °C a + 60 °C. Os dados meteorológicos foram armazenados em um Datalogger modelo CR10X, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah. Os dados coletados foram de janeiro de 2017 a dezembro de 2019.

3.2.2. Concentração do *Black Carbon*

As medidas equivalentes de concentração de *Black Carbon* (simplesmente denominadas *BC*) foram obtidas a partir de um aetalômetro AE33 (Drinovec et al., 2015), sem capacidade de ponto duplo ($\lambda = 370, 470, 520, 590, 660, 880$ e 950 nm). As medidas de espalhamento foram realizadas com um nefelômetro Ecotech M9003 com medidas em 525 nm. O aetalômetro e o nefelômetro foram instalados no interior da Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, com temperatura e umidade relativa do ar controladas (ar-condicionado regulado a 25 °C e desumidificador de ar). Esse equipamento foi conectado em paralelo a uma entrada de corte de seção PM 2.5 a 3 Lmin⁻¹ vazão, com 2 Lmin⁻¹ sendo amostrado pelo aetalômetro e 1 Lmin⁻¹ pelo nefelômetro. (Palácios et al., 2022). A entrada foi instalada a uma altura de $4,5$ m acima do nível do solo. Foi utilizada sílica em gel para controlar a umidade do ar amostrado pela entrada. A sílica gel foi removida e substituída semanalmente para manter a umidade do ar da amostra abaixo de 40% .

As medidas de concentração de *BC* (calculadas internamente pelo instrumento usando o coeficiente de absorção de 880 nm) sendo esse o valor esse utilizado junto a concentração de *Black Carbon* para observação dos impactos na temperatura do ar e umidade relativa, foram realizadas a cada 10 min, medidas do coeficiente de espalhamento a cada 5 min. Os dados analisados foram obtidos calculando-se a média dessas medidas a cada 30 min, corrigidas para temperatura e pressão padrão (STP, $273,15$ K e $1013,25$ hPa). Para calcular o albedo de espalhamento simples (ω_0) o coeficiente de absorção (corrigido) a 525 nm foi interpolado. Para garantir a qualidade do espectral de absorção medido, foi utilizado um critério de filtragem. Todos os dados cuja medida da concentração de *BC* estava abaixo do limite de detecção do instrumento foram excluídos da série (Rizzo et al., 2011).

As medidas das da concentração de *BC* foram calculadas internamente pelo instrumento usando o coeficiente de absorção a 880 nm e ocorreram a cada intervalo de 10 minutos. Paralelamente, às medições do coeficiente de dispersão foram obtidas a cada 5 minutos. Os dados examinados neste estudo foram derivados calculando a média dessas medições a cada período de 30 minutos, ajustadas para a temperatura e pressão padrão (STP, $273,15$ K e $1013,25$ hPa). No cálculo do albedo de espalhamento

simples (α), o coeficiente de absorção (corrigido) a 525 nm foi interpolado. Foi aplicado um critério de filtragem para assegurar a qualidade do espectro de absorção medido e garantir sua precisão. Qualquer dado no qual a medição da concentração de BC estivesse abaixo do limite de detecção do instrumento foi excluído da série analisada (Rizzo et al., 2011).

Devido às limitações da instrumentação, as medidas dos coeficientes de absorção precisaram ser corrigidas (Rizzo et al., 2011; Saturno et al., 2017). As medições do coeficiente de espalhamento que são (medidas pelo nefelômetro) também estão sujeitas a erros de truncamento angular. Com base em Müller e colaboradores (2011) e Rizzo e colaboradores (2013) pode-se dizer que esses erros podem causar uma subestimação de 10% a 20% nos coeficientes de espalhamento. Como nosso instrumento faz medições em um único comprimento de onda (525 nm), sem medidas de retro espalhamento, não foi possível utilizar um modelo de correção, de modo que as medidas para os coeficientes de espalhamento estão sujeitas a essa faixa de incerteza (Palácios et al., 2022).

3.3. ANÁLISE ESTÁTISTICA

3.3.1. Informação Mútua

A informação mútua (IM) se trata de um ramo da teoria da informação, tornando possível a interpretação de mensagens a partir da seleção de atributos através da entropia (Tisoc and Beltrán, 2022). O principal objetivo deste método é ressaltar a dificuldade existente à sua aplicação nos dados utilizados para este estudo, por se tratar de variáveis aleatórias sem vínculo, e sua solução. A teoria da informação possibilita se formar um conceito matemático que torna possível a interpretação das informações contidas em um conjunto de dados. Se caso uma informação já conhecida a priori, a informação obtida será nula. Logo, quanto menor o grau de previsibilidade da mensagem adquirida, maior será a quantidade de informações contidas naquele conjunto (Principe and Xu, 2000).

O conceito de entropia de informação foi introduzido por (Shannon, 1948), a entropia de Shannon se trata de funções de massa de probabilidade, $p(x)$, sendo usualmente descrita como (Das and Bhattacharyya, 2009):

$$H_s(X) = H(p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n))$$

Onde, x é uma variável discreta aleatória de X , em um conjunto discreto $X = \{X_1, \dots, X_n\}$, com função de massa de probabilidade $p(x) = Pr(X = x)$. A entropia de Shannon de X , $H(X)$, é definida como (Batina et al., 2011):

$$H_s(X) = - \sum_{x \in X} p(x) \log_b p(x) = \sum_{x \in X} p(x) \log_b \frac{1}{p(x)}$$

Por fim o método consiste em calcular informação mútua entre duas variáveis aleatórias, ou quantidade de informação que uma variável detém sobre a outra (Tisoc and Beltrán, 2022). O método de informação mútua foi calculado entre as variáveis Temperatura do Ar e Concentração de *Black Carbon*, Coeficiente de Absorção a 880nm e Temperatura do Ar, Concentração de *Black Carbon* e Umidade Relativa do Ar, Coeficiente de Absorção a 880nm e Umidade Relativa do Ar.

3.3.2. Kruskal-Wallis e Dunn

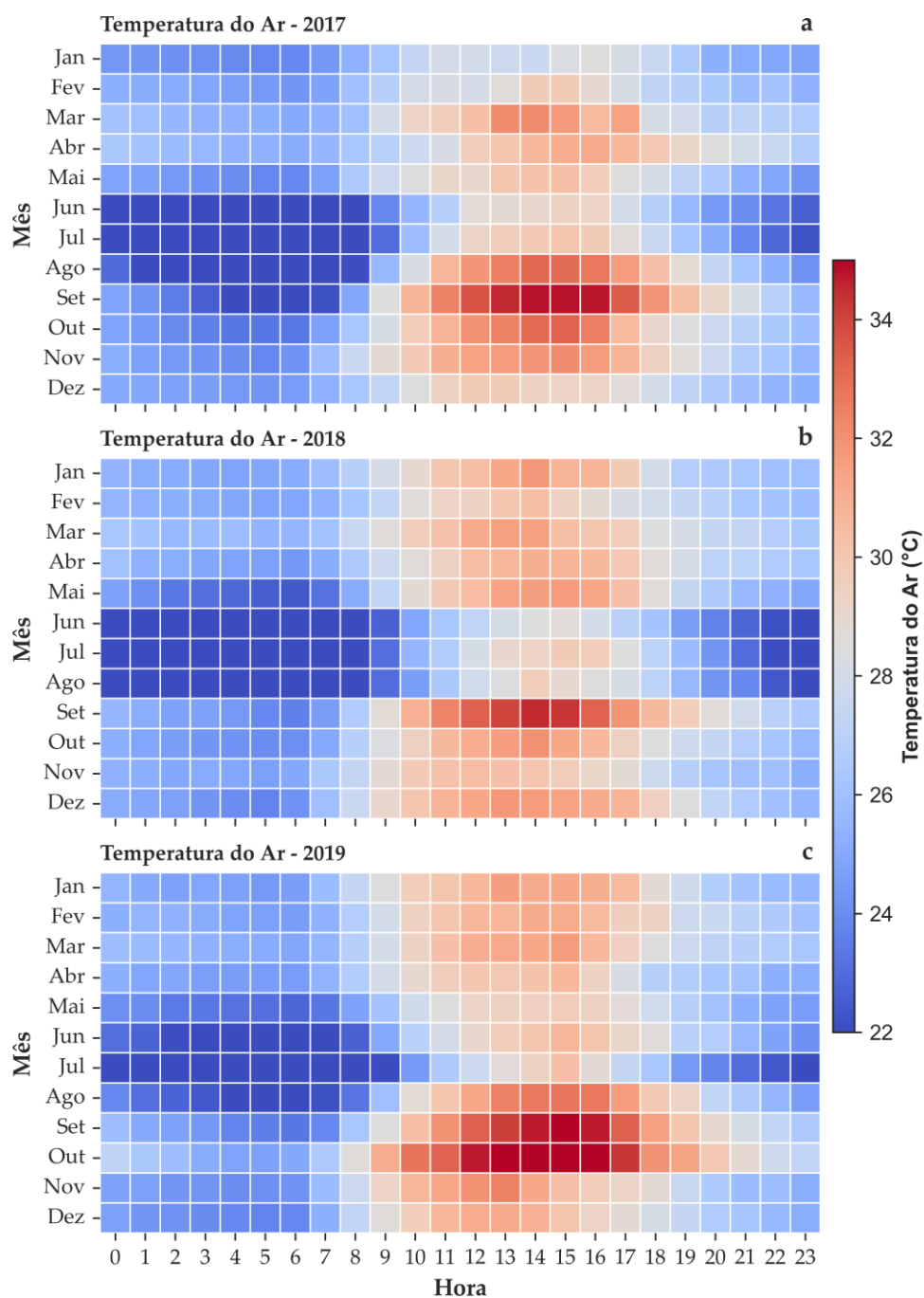
Em seguida, neste estudo foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis e Dunn. O teste de Kruskal-Wallis é utilizado para identificar se três ou mais grupos independentes tem diferença estatisticamente significativa entre as medianas (Ertas et al., 2018). Para identificar quais grupos se diferem é necessário utilizar outro teste, o teste mais apropriado é o teste de Dunn, que consiste em determinar quais grupos tem diferença estatisticamente significativa de (alpha) (Elliott and Hynan, 2011).

Para verificar a significância de cada variável, temperatura do ar, umidade relativa do ar, coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm e concentração de *Black Carbon*. De um conjunto de dados que não tem distribuição normal ($p\text{-valor} < 0.05$), foram realizados testes não-paramétricos para comparação entre os grupos. Inicialmente realizou-se o teste de Kruskal-Wallis, a um nível de significância de 5% em cada uma das variáveis de forma individual para os três anos estudados, após testar diferenças significativas entre as classes, foi realizado o pós-teste de Dunn, possuindo um nível de significância de 5%, para verificação de diferenças entre pares de classes para cada variável, possibilitando identificar as classes que mais diferem entre si.

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DE MICROCLIMA (TEMPERATURA DO AR)

A temperatura do ar apresenta os maiores valores médios durante os períodos secos, que ocorrem de maio a setembro (Figura 1). Isso ocorre devido aos baixos índices de precipitação, resultando na diminuição do calor latente e proporcionando um excedente de energia para o aumento da temperatura (Varejão, 2006). A Figura 1 tem medidas de temperatura do ar e horário, e seus máximos são apresentados em períodos após as 13 horas local para o ano de 2017 apresentando valores superiores a 34°C observados na (Figura 1 em **a**) para o período de seca, para o ano de 2018 a máxima temperatura é apresentada as 14 horas local, e no ano de 2019 sua máxima ocorre as 12 horas com valores de acima de 34°C para o ano de 2017. Padrão esse observado para os três anos da série de dados.



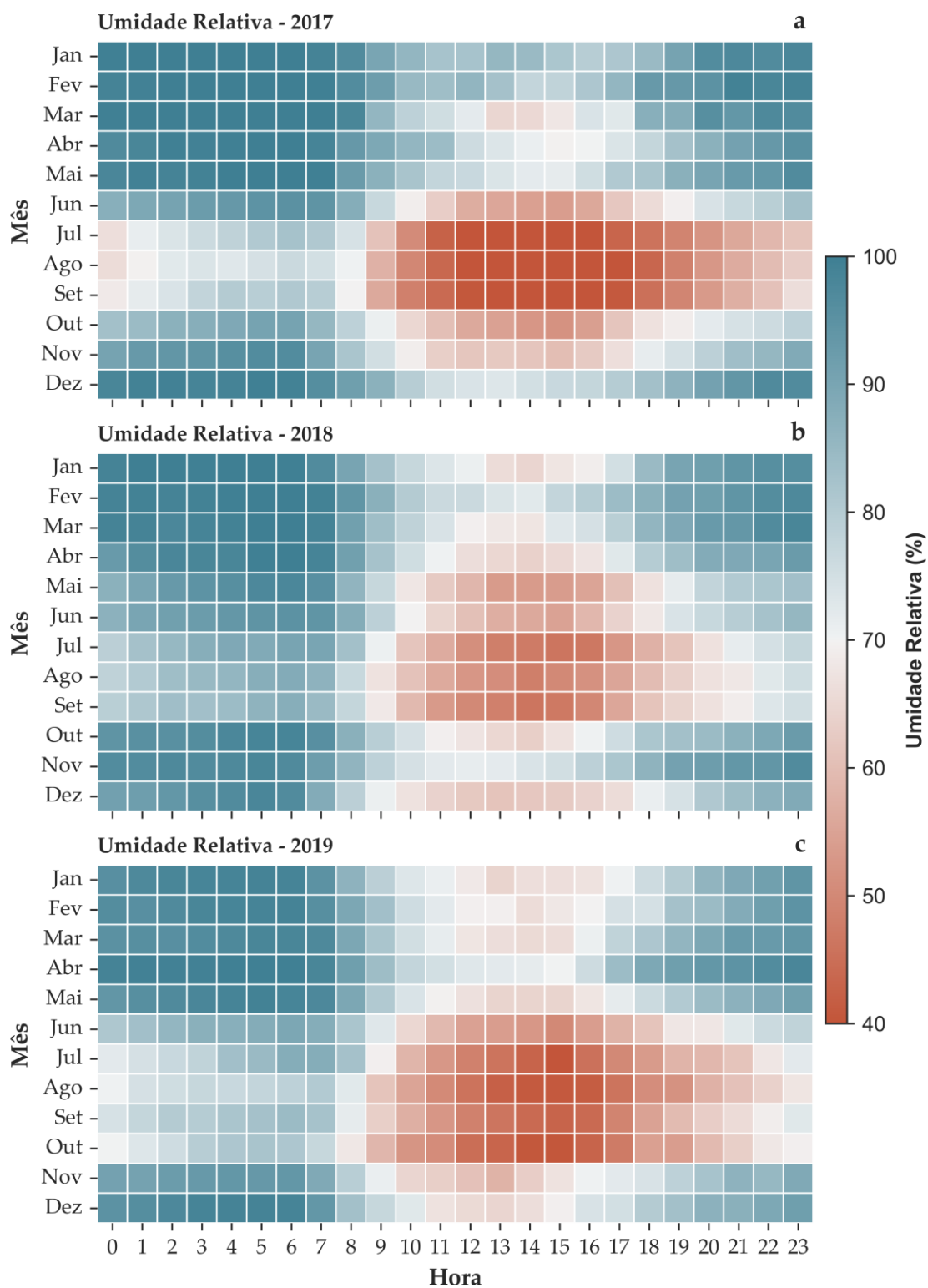
Fonte: Autor.

Figura 2. Média horária da temperatura do ar do Pantanal mato-grossense de 2017 a 2019.

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO DE MICROCLIMA (UMIDADE RELATIVA DO AR)

A umidade relativa do ar (UR) se trata de uma medida que expressa a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera. A umidade relativa do ar está diretamente ligada a temperatura do ar, quando a temperatura apresenta aumento, a capacidade do ar em reter a umidade também aumenta, fazendo com que haja a redução na umidade relativa devido à quantidade de vapor d'água presente no ar, aquecendo o mesmo (VAREJÃO, 2006).

Similar ao que ocorre na figura 1, onde é apresentado valores acima de 30° para a temperatura do ar, para o período de seca (maio a setembro), temos o valor da umidade relativa do ar em 40% para os anos de 2017 e 2019, e 50% ~ 60% para o ano de 2018, sendo o mesmo período que apresenta valores elevados para a variável de temperatura observados na (Figura 2), resultando em uma atmosfera mais seca.



Fonte: Autor.

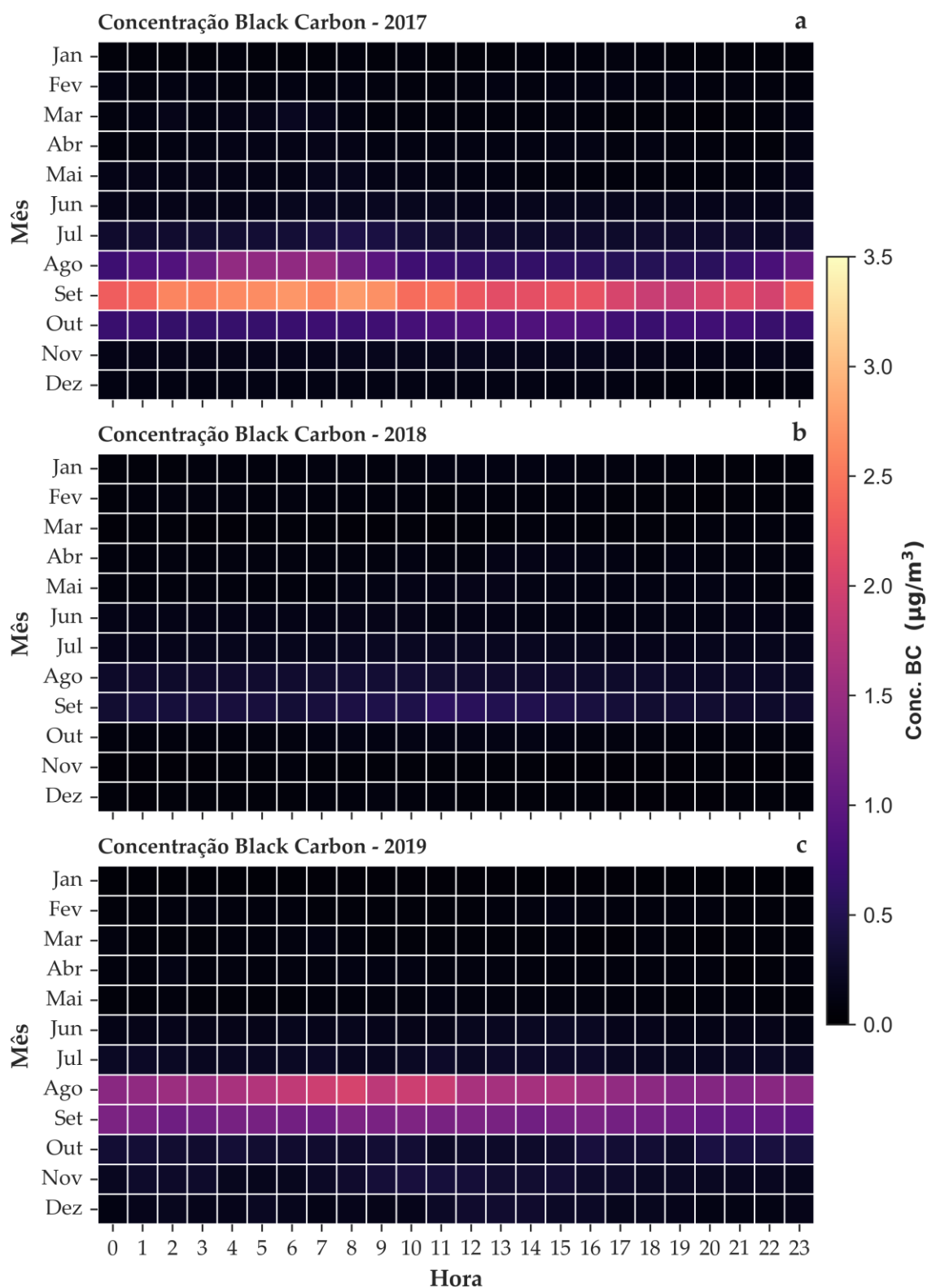
Figura 3. Média horária da umidade relativa do ar do Pantanal mato-grossense de 2017 a 2019.

A umidade relativa do ar segue padrões semelhantes aos da temperatura do ar. Com o aumento da temperatura, a umidade relativa tende a diminuir devido ao aquecimento da região como mencionado anteriormente, resultando em uma relação inversamente proporcional. No entanto, é importante destacar que, para o ano de 2018, foram observados padrões distintos em comparação com os anos de 2017 e 2019 (podendo ser observados na figura 2). Essa variação indica uma particularidade nesse período, sugerindo a influência de fatores específicos que afetaram os padrões usuais de comportamento da umidade relativa do ar para a região do pantanal.

4.1.3. PADRÕES NA CONCENTRAÇÃO DE *BLACK CARBON* E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE *BLACK CARBON* EM 880NM

4.1.3.1. Concentração de *Black Carbon*

As concentrações de *Black Carbon* apresentam valores elevados principalmente no período de seca, devido a atividades antrópicas como a queima de biomassa da região pantaneira, fazendo com que o material particulado seja depositado na atmosfera, alterando assim a temperatura do ar e umidade relativa do ar nossas variáveis deste estudo. Iniciando no período de setembro para os anos de 2017 e 2019, com maiores índices de queimadas, o ano de 2018 foi atípico em relação aos dois devido ao processo natural de recuperação da vegetação aos eventos que ocorreram em 2017, sem biomassa sem altos níveis de produção de *Black Carbon*, apresentando valores menores a $0.5 (\mu g.m^{-3})$, para o ano de 2018 enquanto em 2017 e 2019 tivemos valores próximos a $2,5 (\mu g.m^{-3})$ para sua média, podendo ser observados na figura 3.

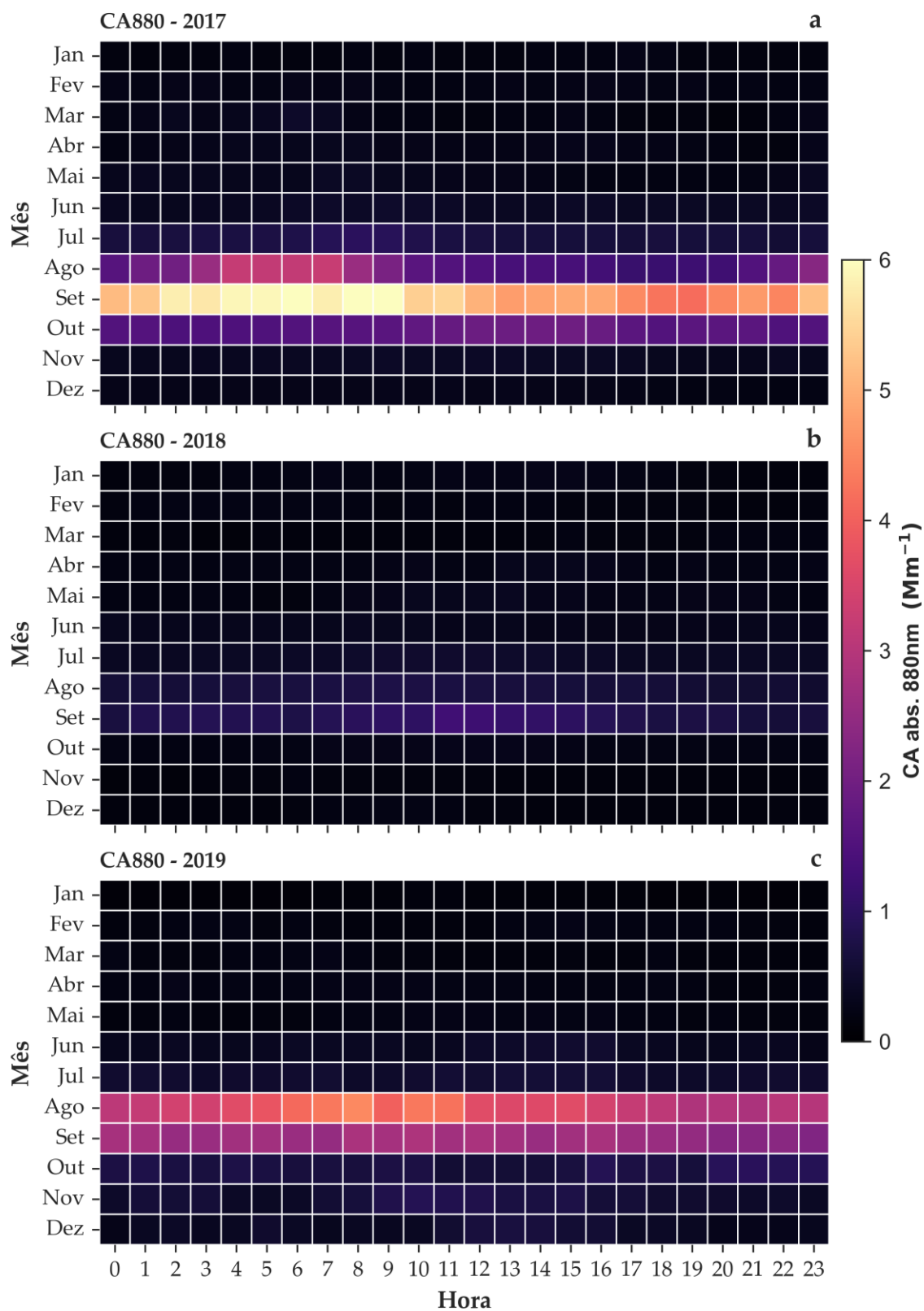


Fonte: Autor.

Figura 4. Relação da caracterização da concentração de *Black Carbon* no PantanalMatogrossense para os anos de 2017 à 2019.

4.1.3.2. Coeficiente de Absorção de *Black Carbon* em 880nm

O coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm, representa uma faixa da total medida, sendo a mais utilizada devido a sua capacidade de detecção das partículas de *Black Carbon*, onde sua maior representativa de ocorreu no ano de 2017 e 2019. O coeficiente de absorção *Black Carbon* em 880nm, ou qualquer outro comprimento de onda específico, pode depender de diversos fatores, incluindo a fonte do BC, o ambiente em que está presente, e as condições atmosféricas. O BC, também conhecido como fuligem, é uma forma de carbono amorfo que resulta da combustão incompleta de material orgânico, como diesel, carvão e biomassa.



Fonte: Autor.

Figura 5. Caracterização do coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm no Pantanal para os anos de 2017 2018 e 2018.

Os aerossóis apresentam propriedades ópticas dos aerossóis, uma delas o processo de absorção, sendo fundamental para a compreensão do papel destas partículas nos ecossistemas e no clima em geral. Devido as mudanças nos níveis de precipitação na região sul da bacia amazônica, houve um aumento considerável na queima de biomassa, através do qual grandes quantidades de aerossóis e gases são emitidas para a atmosfera. Este aumento das emissões pode impactar o ecossistema, modificando os fluxos de massa e energia na superfície (Palácios et al., 2022). A partir desses dados, as propriedades ópticas dos aerossóis podem ser observadas para o coeficiente de absorção na figura 3, e a concentração de *BC* na figura 4.

4.2. TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR, CONCENTRAÇÃO DE *BLACK CARBON* E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE *BLACK CARBON* EM 880NM, PRECIPITAÇÃO E FOCOS DE QUEIMADAS

Os resultados abaixo correspondem aos anos de 2017, 2018 e 2019, possibilitando a observação do aumento da temperatura do ar e diminuição da umidade relativa do ar em períodos com maior presença do *Black Carbon* na figura 6 (a). Para devida análise, os dados foram separados em dois períodos sendo seco (maio a setembro) e chuvoso de (outubro a abril). A verificação do aumento da temperatura do ar e diminuição da umidade relativa ar pode ser observada, além do aumento dos focos de queimadas para os períodos de seca, relacionando assim as variáveis para tal período.

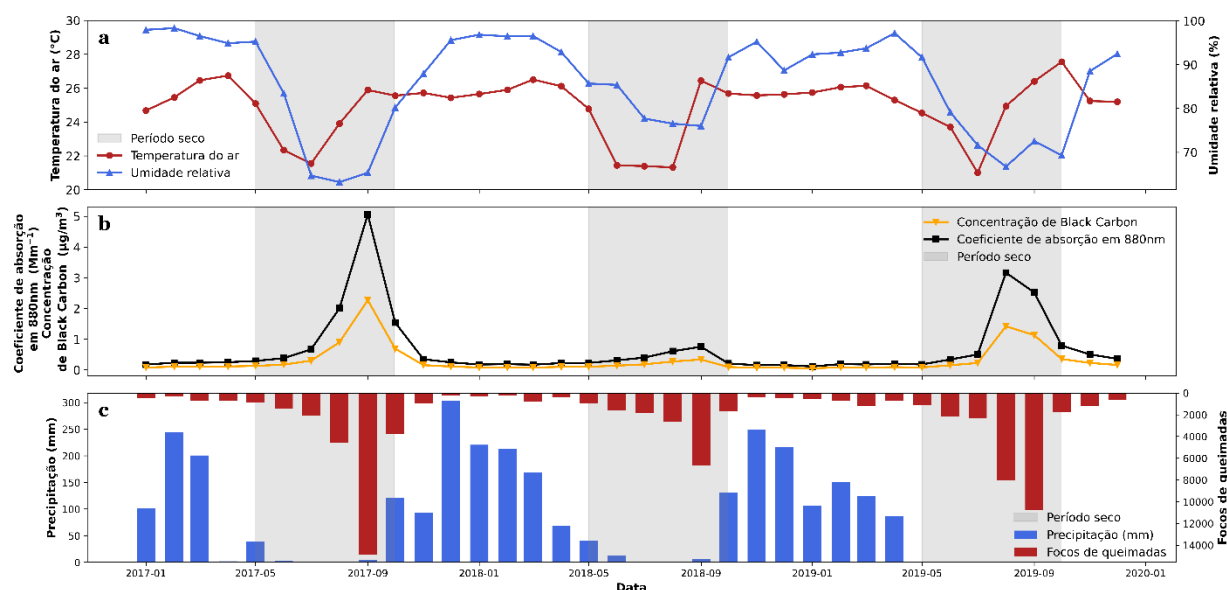


Figura 6. Temperatura e umidade relativa do ar **(a)**, coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm e Concentração de *Black Carbon* **(b)**, precipitação e focos de queimadas em **(c)**, de janeiro de 2017 a dezembro de 2019 separados em período seco e chuvoso.

Para o ano de 2017, a temperatura do ar apresentou valores mínimos de 21,55°C para o mês de julho e 26,74°C máxima para o mês de abril, com umidade relativa do ar apresentando mínima de 63,22% para o mês de agosto de mínima e máxima de 98,31% em fevereiro, por se tratar de variáveis inversamente proporcionais, (já se espera o aumento de uma e diminuição da outra). O coeficiente de absorção de *Black Carbon* a 880nm apresentou valores máximos de 5,06 ($M.m^{-1}$) para o último mês que condiz ao período seco (setembro) pré-definido inicialmente para esse estudo, além de ser o mês com maior queima de biomassa, podendo ser observado no item **(c)** da figura 6, com focos de queimadas que chegaram ao valor de 14000 (dados obtidos do INPE), essa situação resultou no aumento das partículas de *BC* na região. Já a concentração de *Black Carbon* seu valor máximo neste mês de setembro de 2017 com média de 2,27 ($\mu g.m^{-3}$), por estar diretamente relacionada ao coeficiente de 880nm, seu comportamento é similar a evolução referente ao aumento característico de acordo com as partículas de *Black Carbon*.

Para o ano de 2018 temos a temperatura do ar com valores de máxima de 26,51°C para o mês de fevereiro, e mínima de 21,32°C em agosto, a umidade relativa

do ar apresentou o valor de 76,01% como mínima em setembro e 96,81% de máxima para o mês de janeiro, havendo diferença em relação ao ano anterior, devido à redução nos focos de queimadas e presença do *Black Carbon* para o ano, fato ao processo natural de recuperação da vegetação, e não haver biomassa disponível para obtenção de valores similares ao ano de 2017 (Weber, 2023). Sendo apresentado valores para o coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm valores máximos de 0,75 ($M.m^{-1}$) para o mesmo mês de setembro, que no ano anterior apresentou valor de 5,06 ($M.m^{-1}$). Para a concentração de *Black Carbon* temos o mesmo comportamento, valores abaixo do padrão obtido anteriormente sendo $0,33(\mu g.m^{-3})$ para o mês mais crítico (setembro) que apresentou valores de 2,27 no mesmo período do ano anterior.

No último ano da série de dados (2019) é possível se observar o comportamento característico apresentado pelo Pantanal em relação aos valores obtidos para as médias que correspondem a temperatura do ar e umidade relativa do ar, com o valor mínimo para o ano sendo de $21,01^{\circ}C$ em julho similar ao ano de 2017, e máxima de $27,56^{\circ}C$ que corresponde ao mês de outubro de 2019 onde o aumento da temperatura do ar ocorre em meses com maior concentração de partículas de *Black Carbon* presentes na atmosfera. A umidade relativa do ar teve valores de mínima correspondentes a 66,74% em agosto, enquanto sua máxima chegou a 97,17% para o mês de abril do ano de 2019, ano esse que apresentou valores maiores ao ano anterior, em termos de *Black Carbon* devido ao retorno de atividades antrópicas como a queima de biomassa que ocorreram na região e aumento dos focos de queimadas e redução da precipitação local observados em (c). Os valores para o coeficiente de absorção em 880nm tiveram valores máximos de 3,16 ($M.m^{-1}$) em agosto de 2019, e para a Concentração de *Black Carbon* foi registrado valores de $1,42(\mu g.m^{-3})$ em agosto de 2019.

Esse aumento da temperatura ocorre devido ao acúmulo das partículas de *Black Carbon* na atmosfera local, aquecendo após um tempo o ar circundante, fazendo com que haja o aumento da temperatura do ar (Feng et al., 2013). Por consequência a diminuição da umidade relativa do ar da região, em períodos chuvosos temos a temperatura se mantendo seguindo os padrões habituais, podendo até diminuir, e a umidade relativa do ar apresentando valores próximos a 100% de acordo com os padrões normais para a região. Devido ao fato da atmosfera se manter limpa com os altos níveis de precipitação.

Durante o ano de 2017, o Pantanal registrou aumento de incêndios INPE (2017-2019). As queimadas foram intensificadas devido à combinação de condições climáticas adversas, como baixa umidade e altas temperaturas, podendo ser observadas na figura 6 (c), juntamente com atividades humanas, como a prática de queimadas para limpeza de terras para agricultura e pecuária.

Já o ano de 2018 os focos também se fizeram presentes, mas não com a mesma intensidade da apresentada no ano de 2017, devido a grande quantidade de biomassa já atingida no ano anterior o bioma pantaneiro se encontrava em processo de recuperação, mesmo lidando com períodos longos de seca. As concentrações de *Black Carbon* são influenciadas pelas fontes antropogênicas (Schmeisser et al., 2018) e pelas condições meteorológicas do local. Alguns estudos (Dumka et al., 2018; Magalhães, 2017) apontam que a emissão de BC, proveniente de fontes antropogênicas, em escala global, é atribuída à combustão de biocombustíveis (~20%), combustíveis fósseis (~40%) e à queima aberta de biomassa, que inclui incêndios florestais e queima de resíduos agrícolas (~40%). Essas frações variam dependendo se a área for urbana ou rural. As emissões veiculares dominam em ambientes urbanos e a queima de biomassa em áreas rurais. Esta alta concentração de *BC* sugere que o ar está principalmente poluído pelas atividades antrópicas.

Durante os meses da estação seca, especialmente agosto e setembro e outubro de 2019, ocorre a diminuição da precipitação (podendo ser observada na figura 6 (c) com as chuvas sendo menos frequentes, os valores de focos de queimadas aumentam drasticamente. E medida que os focos de queimadas se reduzem, os valores da concentração de *BC* e Coeficiente de absorção tendem a diminuir.

O aumento da umidade relativa do ar (UR) durante a estação chuvosa favorece a deposição úmida das partículas de *BC*, e a baixa UR durante o período seco inibe a eliminação das partículas, contribuindo assim para a alta concentração de *BC* (Panicker et al., 2019). Alguns estudos anteriores revelam várias partes do mundo com resultado similar aos obtidos. Podendo ser citado um estudo realizado na encosta Sul do Himalaia ocidental da Índia, em 2016 e outro realizado em Karachi no Paquistão, de 2006 a 2008, que também encontraram uma correlação negativa entre a UR e a concentração de *BC* (Navinya et al., 2020).

4.3. INFORMAÇÃO MÚTUA ENTRE AS VARIÁVEIS ANALISADAS

Nesse estudo foi necessário substituir a correlação clássica, por uma ferramenta matemática que permitisse quantificar as correlações entre duas variáveis aleatórias que é a Informação Mútua (“Elements of Information Theory,” 2001). Apesar da informação mútua ser originalmente uma medida de correlações clássicas, uma generalização correta desta quantidade nos permitirá quantificar as correlações totais (Henderson and Vedral, 2001; Ollivier and Zurek, 2001).

Usando a ideia de entropia da informação, se a temperatura do ar e concentração de *Black Carbon* estejam correlacionadas, então a redução da incerteza na temperatura do ar nos permitirá reduzir a incerteza sobre concentração de *Black Carbon* (Isso vale para a umidade relativa do ar e coeficiente de absorção de *BC* em 880nm). Dado que as correlações estão intimamente relacionadas com a informação sobre uma variável aleatória, sendo estudada correlações usando a estrutura de entropia da informação clássica introduzida por Claude Shannon. (Cerino et al., 2023; Tisoc and Beltrán, 2022).

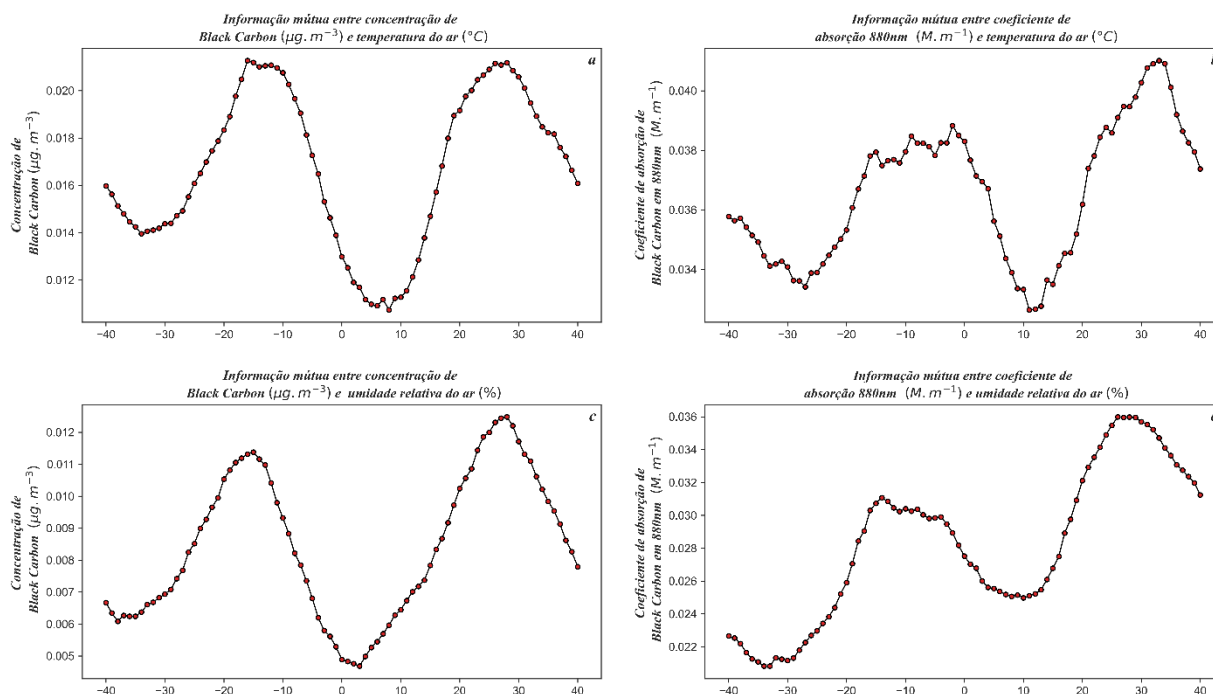


Figura 7. Informação Mútua entre as variáveis de temperatura do ar e concentração de *Black Carbon* em **a**, Informação Mútua entre coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm e umidade relativa em **b**, Informação Mútua entre as variáveis de

umidade relativa ar e concentração de *Black Carbon* em **c**, Informação Mútua entre coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm e umidade relativa do ar em **d**.

A partir das combinações indicadas na (Figura 7a, b, c e d), foi obtido valores distintos para as variáveis. Essas variáveis possuem valores que não se igualam a um. Isso destaca a completa independência, já descrito anteriormente. A análise adicional revela uma possível influência mútua, evidenciada pelo valor resultante da entropia conjunta, observado no eixo (y). Essa medida reflete a complexa interação entre as variáveis, indicando como suas mudanças simultâneas podem impactar a entropia do sistema de forma conjunta e uma impactar sobre a outra (Tisoc and Beltrán, 2022). A seguir será utilizado os testes de Kruskal-wallis e pós teste de Dunn para verificação das mudanças observadas em cada variável e seu ano correspondente se foi ou não significativo.

4.4. INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA DE KRUSKALL WALLIS E DUNN PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS

Após a análise da informação mútua, a utilização de testes não-paramétricos possibilitaria determinar a significância e influência de uma variável sob a outra. Para avaliar a similaridade ou não entre as medianas de três ou mais grupos, recorreu-se ao teste de Kruskal-Wallis para verificação das possíveis mudanças obtidas em cada variável dentre os três anos estudados (Elliott and Hynan, 2011). Em seguida o uso do teste de Dunn, utilizado para a comparação apropriada de cada variável, permitindo a observação de significância em relação as mudanças ao longo dos anos como na (Figura 8). Sendo utilizado nas variáveis de temperatura e umidade relativa do ar, coeficiente de absorção de Black Carbon em 880nm e concentração de Black Carbon

os três anos estudados.

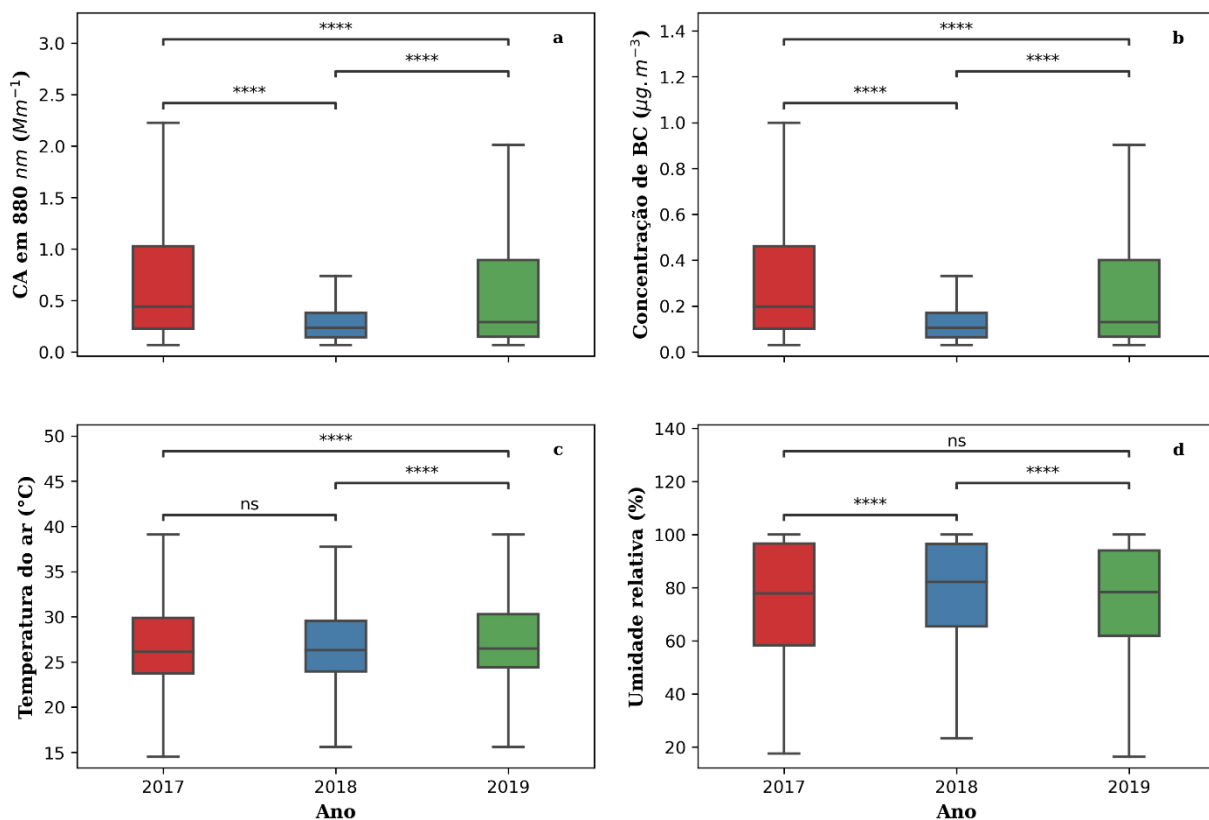


Figura 8. Teste de Kruskal-Wallis e teste de Dunn para as variáveis temperatura e umidade relativa do ar, coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm e concentração de *Black Carbon*. para os anos de 2017, 2018 e 2019.

Em seguida a realização dos testes, foi possível observar mudanças significativas para as variáveis dos três anos estudados, o coeficiente de absorção de *Black Carbon* em 880nm apresentou mudanças significativas após a realização dos testes de comparação entre cada ano, sendo pares para 2017 e 2018, 2018 e 2019 finalizando com 2017 e 2019, esse tratamento possibilitou observar o comportamento da variável ao longo do período estudado como na Figura 8 item **a** apresentando mudanças significativas para cada ano sendo representadas pelo (*) e (ns) para não significativa as mudanças presente na Figura 8. Esse padrão se repete em nossas variáveis, o comportamento observado na concentração de *Black Carbon* em **b**. A temperatura do ar, não apresentou mudanças significativas entre os anos de 2017 e 2018 (conforme indicado na Figura 8, item **c**), foi constatada significância entre os anos de 2017 e 2019, similar ao apresentado entre 2018 e 2019. Para variável umidade

relativa, onde após realização dos testes não foram identificadas diferenças significativas entre 2017 e 2018, 2018 e 2019. Mas, para o ano de 2017 e 2019, foi constatado a não significância. Após o tratamento de cada variável para verificação se os anos apresentaram aumento significativo ou não, após a realização dos testes foi observado que ocorre e os testes de Kruskal-Wallis para a verificação de diferenças entre as medianas e do teste de Dunn para a identificação das diferenças por meio de comparações entre os grupos (Elliott and Hynan, 2011).

5. CONCLUSÃO

As análises de cenários climáticos envolvendo o bioma Pantanal apresentou alterações na temperatura do ar ao longo dos anos estudados, embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre 2017 e 2018. Entretanto, a umidade relativa do ar no Pantanal apresentou variações notáveis durante o período de estudo, com exceção do intervalo entre 2017 e 2019. Essas condições são desfavoráveis para o bioma, caracterizadas pela redução do regime de precipitação e aumento dos focos de queimadas, especialmente para os períodos de seca mais severos, entre julho e outubro de cada ano.

A presença do *Black Carbon* (BC) intensificada durante esses períodos críticos de seca, acabou por contribuir com o aumento da temperatura do ar e a diminuição da umidade relativa. Mudanças que resultaram em alterações no balanço, impactando diretamente o bioma local. Diante essas variações, componentes vitais encontraram dificuldades para recuperação nos períodos de seca, resultando em desafios para o ecossistema pantaneiro. Dificultando a restauração e aumentando o risco de extinção para algumas espécies.

Portanto, as variáveis de temperatura do ar umidade relativa do ar, associados diretamente ao aumento das partículas de BC, influenciam todo o ciclo natural do bioma Pantanal conforme evidenciado nos testes realizados ao longo do trabalho. Essas mudanças representam uma ameaça considerável à sustentabilidade e à biodiversidade desse ecossistema singular, destacando a urgência de medidas eficazes para mitigar os impactos das atividades humanas e assegurar a preservação da rica fauna e flora pantaneiras para as futuras gerações.

Agradecimentos

À CAPES, pelo apoio financeiro; aos colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental e à Universidade Federal de Mato de Grosso.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alho, C.J.R., Silva, J.S.V., 2012. Effects of Severe Floods and Droughts on Wildlife of the Pantanal Wetland (Brazil)—A Review. *Animals* 2, 591–610. <https://doi.org/10.3390/ani2040591>

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Alves, C., 2005. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. *Quím. Nova* 28, 859–870. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500025>

Angelini, L.P., Silva, P.C.B.S. e, Fausto, M.A., Machado, N.G., Biudes, M.S., 2017. Balanço de Energia nas Condições de Mudanças de Uso do Solo na Região Sul do Estado de Mato Grosso. *Rev. bras. meteorol.* 32, 353–363. <https://doi.org/10.1590/0102-77863230003>

Batina, L., Gierlichs, B., Prouff, E., Rivain, M., Standaert, F.-X., Veyrat-Charvillon, N., 2011. Mutual Information Analysis: a Comprehensive Study. *J Cryptol* 24, 269–291. <https://doi.org/10.1007/s00145-010-9084-8>

Bergier, I., Silva, A.P.S., Abreu, U.G.P. de, Oliveira, L.O.F. de Tomazi, M., Dias, F.R.T., Urbanetz, C., Nogueira, É., Borges-Silva, J.C., 2019. Could bovine livestock intensification in Pantanal be neutral regarding enteric methane emissions? *Science of The Total Environment* 655, 463–472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.178>

Cerino, M.B.R., Silva, H.J.A., Paulo, S.R. de, Gaio, D.C., 2023. INFORMAÇÃO MÚTUA ENTRE RADIAÇÃO LÍQUIDA MEDIDA E RECONSTITUÍDA A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS DE TEMPERATURA. *Nativa* 11, 21–27. <https://doi.org/10.31413/nativa.v11i1.14190>

- Chen, W., Song, G., Zhao, H., Sun, S., Wu, Y., 2021. Equivalent Black Carbon Aerosol Properties and Their Relationship with the Heating Season in Urban Environments. *Atmosphere* 12, 1314. <https://doi.org/10.3390/atmos12101314>
- Curado, L.F.A., Rodrigues, T.R., Biudes, M.S., Paulo, S.R. de, Paulo, I.J.C. de, Nogueira, J. de S., 2011. Estimativa Sazonal da Emissividade Atmosférica através da Equação de Brutsaert no Norte do Pantanal Mato-Grossense. *Ciência e Natura* 33, 167–180. <https://doi.org/10.5902/2179460X9368>
- Das, C., Bhattacharyya, K., 2009. Information entropy and bound quantum states. *Physical Review A* 79, 012107.
- Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A.S.H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Rupakheti, M., Sciare, J., Müller, T., Wiedensohler, A., Hansen, A.D.A., 2015. The “dual-spot” Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation. *Atmospheric Measurement Techniques* 8, 1965–1979. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1965-2015>
- Dumka, U.C., Kaskaoutis, D.G., Tiwari, S., Safai, P.D., Attri, S.D., Soni, V.K., Singh, N., Mihalopoulos, N., 2018. Assessment of biomass burning and fossil fuel contribution to black carbon concentrations in Delhi during winter. *Atmospheric Environment* 194, 93–109. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.033>
- Elements of Information Theory, 2001. , in: Average Case Analysis of Algorithms on Sequences. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 149–210. <https://doi.org/10.1002/9781118032770.ch6>
- Elliott, A.C., Hynan, L.S., 2011. A SAS® macro implementation of a multiple comparison post hoc test for a Kruskal–Wallis analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 102, 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.11.002>
- Ertas, R., Ozyurt, K., Atasoy, M., Hawro, T., Maurer, M., 2018. The clinical response to omalizumab in chronic spontaneous urticaria patients is linked to and predicted by IgE levels and their change. *Allergy* 73, 705–712. <https://doi.org/10.1111/all.13345>
- Feng, Y., Ramanathan, V., Kotamarthi, V.R., 2013. Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation? *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 8607–8621. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8607-2013>
- Guimarães, D.P., Landau, E.C., Santos, M.C.B., Mendes, S., 2018. Caracterização das chuvas no Pantanal Mato-grossense. em: Anais do VII Simpósio de Geotecnologias

no Pantanal. EMBRAPA/INPE, Jardim, Brasil 555–562.

Henderson, L., Vedral, V., 2001. Classical, quantum and total correlations. *J. Phys. A: Math. Gen.* 34, 6899. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/34/35/315>

Liu, L., Cheng, Y., Wang, S., Wei, C., Pöhlker, M.L., Pöhlker, C., Artaxo, P., Shrivastava, M., Andreae, M.O., Pöschl, U., Su, H., 2020. Impact of biomass burning aerosols on radiation, clouds, and precipitation over the Amazon: relative importance of aerosol–cloud and aerosol–radiation interactions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20, 13283–13301. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13283-2020>

Lucas, K.R.G., Caldarelli, C.E., Ventura, M.U., 2023. Agriculture and biodiversity damage: A prospective evaluation of the impact of Brazilian agriculture on its ecoregions through life cycle assessment methodology. *Science of The Total Environment* 899, 165762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165762>

Magalhães, N. de, 2017. Contribuição das queimadas na América do Sul para o derretimento das geleiras andinas : estudo de caso sobre o impacto do aerossol “black carbon” na geleira Zongo-Bolívia [WWW Document]. URL <https://app.uff.br/riuff/handle/1/5152> (accessed 1.29.24).

Navinya, C.D., Vinoj, V., Pandey, S.K., 2020. Evaluation of PM_{2.5} Surface Concentrations Simulated by NASA’s MERRA Version 2 Aerosol Reanalysis over India and its Relation to the Air Quality Index. *Aerosol Air Qual. Res.* 20, 1329–1339. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.12.0615>

Ollivier, H., Zurek, W.H., 2001. Quantum Discord: A Measure of the Quantumness of Correlations. *Phys. Rev. Lett.* 88, 017901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.017901>

Palácios, R., Romera, K., Rizzo, L., Cirino, G., Adams, D., Imbiriba, B., Nassarden, D., Rothmund, L., Siqueira, A., Basso, J., Rodrigues, T., Curado, L., Weber, A., Nogueira, J., Morais, F., Artaxo, P., 2022. Optical properties and spectral dependence of aerosol light absorption over the Brazilian Pantanal. *Atmospheric Pollution Research* 13, 101413. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101413>

Panicker, A.S., Sandeep, K., Negi, R.S., Gautam, A.S., Bisht, D.S., Beig, G., Murthy, B.S., Latha, R., Singh, S., Das, S., 2019. Estimates of Carbonaceous Aerosol Radiative Forcing over a Semiurban Environment in Garhwal Himalayas. *Pure Appl. Geophys.* 176, 5069–5078. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02248-7>

- Pompeu, N., Vilpoux, O.F., 2023. Who wants to pay for Pantanal? Experiences of payment for environmental services in the preservation of a single biome. *Environmental Development* 47, 100903. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100903>
- Principe, J.C., Xu, D., 2000. Information-Theoretic Learning Using Renyi's Quadratic Entropy.
- Rizzo, L.V., Correia, A.L., Artaxo, P., Procópio, A.S., Andreae, M.O., 2011. Spectral dependence of aerosol light absorption over the Amazon Basin. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 8899–8912. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8899-2011>
- Saturno, J., Pöhlker, C., Massabò, D., Brito, J., Carbone, S., Cheng, Y., Chi, X., Ditas, F., Hrabě de Angelis, I., Morán-Zuloaga, D., Pöhlker, M.L., Rizzo, L.V., Walter, D., Wang, Q., Artaxo, P., Prati, P., Andreae, M.O., 2017. Comparison of different Aethalometer correction schemes and a reference multi-wavelength absorption technique for ambient aerosol data. *Atmospheric Measurement Techniques* 10, 2837–2850. <https://doi.org/10.5194/amt-10-2837-2017>
- Schmeisser, L., Backman, J., Ogren, J.A., Andrews, E., Asmi, E., Starkweather, S., Uttal, T., Fiebig, M., Sharma, S., Eleftheriadis, K., Vratolis, S., Bergin, M., Tunved, P., Jefferson, A., 2018. Seasonality of aerosol optical properties in the Arctic. *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, 11599–11622. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11599-2018>
- Shannon, C.E., 1948. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423. - References - Scientific Research Publishing [WWW Document]. URL <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1460694> (accessed 1.29.24).
- Singh, V., Ravindra, K., Sahu, L., Sokhi, R., 2018. Trends of atmospheric black carbon concentration over the United Kingdom. *Atmospheric Environment* 178, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.030>
- Tisoc, M., Beltrán, J.V., 2022. Mutual Information: A way to quantify correlations. *Rev. Bras. Ensino Fís.* 44, e20220055. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0055>
- Tiwari, S., Kumar, H., Singh, S., Kumar, A., 2023. Current status of aerosol-cloud

interactions and their impact over the Northern Indian Ocean: A comprehensive review. *Atmospheric Research* 283, 106555.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106555>

Tiwari, S., Kun, L., Chen, B., 2020. Spatial variability of sedimentary carbon in South Yellow Sea, China: impact of anthropogenic emission and long-range transportation. *Environ Sci Pollut Res* 27, 23812–23823. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08686-4>

VAREJÃO, M.A., 2006. Meteorologia e climatologia. Versão digital 2, 463.

Venkatraman, K., Bhaskar, V., Kesarkar, A.P., 2021. A Systematic Approach to Comprehend the Role of Atmospheric Black Carbon in Different Environmental Segments. *Aerosol Sci Eng* 5, 253–274. <https://doi.org/10.1007/s41810-021-00100-x>

Weber, A. dos S., 2023. Impacto da queima de biomassa nas propriedades físico-químicas de aerossóis no Pantanal brasileiro. *Holos Environment* 23, 119–142. <https://doi.org/10.14295/holos.v23i2.12489>

Zhang, H., Wang, Z., 2011. Advances in the Study of Black Carbon Effects on Climate. *Advances in Climate Change Research* 2, 23–30. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2011.00023>