



INTERAÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM CIDADES DO CENTRO- OESTE BRASILEIRO: ESTUDO SOBRE CONFORTO TÉRMICO, ONDAS DE CALOR E POLUENTES ATMOSFÉRICOS

CLEVERSON RICARDO SOARES VIANA

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso,
como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais para obtenção do título de mestre.

Cáceres,
Mato Grosso, Brasil
2025



CLEVERSON RICARDO SOARES VIANA

**INTERAÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM CIDADES DO CENTRO-
OESTE BRASILEIRO: ESTUDO SOBRE CONFORTO TÉRMICO, ONDAS
DE CALOR E POLUENTES ATMOSFÉRICOS**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso,
como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ernandes Sobreira Oliveira Junior

Cáceres,
Mato Grosso, Brasil
2025

CLEVERSON RICARDO SOARES VIANA

**INTERAÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM CIDADES DO CENTRO-OESTE
BRASILEIRO: ESTUDO SOBRE CONFORTO TÉRMICO, ONDAS DE CALOR E
POLUENTES ATMOSFÉRICOS**

Essa dissertação foi julgada e aprovada como parte dos requisitos para a obtenção do título de
mestrado em Ciências Ambientais.

Banca examinadora

Prof. Dr. ERNANDES SOBREIRA OLIVEIRA JUNIOR
Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Orientador - Presidente da Banca

Prof. Dr. ANTONIO FRANCISCO MALHEIROS
Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Examinador Interno

Prof. Dr. JOÃO BASSO MARQUES
Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT
Examinador Externo

Cáceres, dezembro de 2025.

V614i SOARES VIANA, Cleverson Ricardo.

Interações microclimáticas em cidades do centro-oeste brasileiro: estudo sobre conforto térmico, ondas de calor e poluentes atmosféricos / Cleverson Ricardo Soares Viana. - Cáceres, 2025. 68f.: il.

Universidade do Estado de Mato Grosso "Carlos Alberto Reyes Maldonado", Ciências Ambientais/CAC-PPGCA - Cáceres - Mestrado Acadêmico, Campus Universitário De Cáceres "Jane Vanini".
Orientador: Ernandes Sobreira Oliveira Junior.

1. Crise Climática. 2. Eventos Extremos. 3. Conforto Climático. 4. Poluentes Climáticos. I. Oliveira Junior, Ernandes Sobreira. II. INTERAÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM CIDADES DO CENTRO-OESTE BRASILEIRO: ESTUDO SOBRE CONFORTO TÉRMICO, ONDAS DE CALOR E POLUENTES ATMOSFÉRICOS.

UNEMAT / MT- SCB

CDU 551.584(817)

DEDICATÓRIAS

Pelos caminhos que se abriram, pelos afetos que me sustentaram, pelos saberes que me atravessaram. Sou grato pelo que vivi, pelo que aprendi e por tudo que ainda seguirá pulsando depois deste trabalho.

Em estar em núcleo familiar que sempre me apoia. Meus pais *Eloneide da Silva Soares* e *Cleverson Ricardo Viana*. Irmãos *Eloneide da Silva Soares* e *Ricardo Cleverson Soares Viana*. Meus sobrinhos *Arthur Soares Salaroli* e *Hugo Junior Soares dos Santos*. Aos meus avós *Maria José Aparecida Viana*, *Maria das Graças Soares da Silva* e *Francisco Vieira da Silva*. Amo todos.

A minha família *Soares* e *Viana* que mesmo de longe sempre são fonte de apoio e comemoram cada conquista. Todas as *Tias*, *Tios* e *Primos*.

Aos amigos que tenho *Emilly*, *Alecssandro* e *João*, sendo pessoas que compreendem o bem viver e com eles, compartilho alegrias sinceras e momentos que se tornam especiais pela presença.

Em especial, à minha amada namorada e futura esposa, *Natalia de Campos Borges*, por ser meu alicerce afetivo. Seu amor, sua paciência e o apoio constante ao longo de todos esses anos tornaram cada etapa desta jornada mais leve e possível. Te amo vidinha.

AGRADECIMENTOS

À *Universidade do Estado de Mato Grosso*, por me proporcionar esses anos de estudos. Ao *Laboratório de Investigação Ambiental do Pantanal Norte*, por me acolherem de uma maneira inclusiva proporcionando momentos únicos ao longo da minha caminhada acadêmica científica.

Ao *Centro de Pesquisa de Limnologia, Biodiversidade, Etnobiologia do Pantanal* e ao *Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais* por fornecerem toda a infraestrutura, disciplinas e troca de saberes ao longo do mestrado.

À *Fundação de Apoio ao Ensino Superior Público Estadual*, pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa, essencial para minha dedicação integral à pesquisa.

Ao meu orientador *Dr. Ernandes Sobreira Oliveira Junior* que foi essencial ao longo do mestrado me oferecendo conselhos valiosos, apoio contínuo e sensibilidade científica ao *Dr. Wilkinson Lopes Lázaro* sendo uma pessoa que sempre auxiliou nos momentos de discussões e ao *Dr. Claumir Cesar Muniz* que me acolheu em 2019 e sempre me apoiou.

Ao Pantanal de Cáceres – MT, e aos perímetros ecotonais que aqui estão presentes por ter me proporcionado experiências incríveis. Com isso dando a certeza que a formação que escolhi foi a certa para a minha vida.

Ao *Laboratório de Ecofisiologia Ambiental*, à equipe e aos equipamentos de coleta e análise, cuja contribuição foi indispensável para a precisão técnica e a robustez desta dissertação. Nesse ambiente colecionei amigos de Laboratório, Pesquisa, Ensino e Extensão, que foram fundamentais aos longos dos anos.

Agradeço em especial a todos que de certa forma contribuíram para a minha formação como Biólogo e agora como Mestre em Ciências Ambientais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
RESUMO GERAL.....	9
GENERAL ABSTRACT	10
INTRODUÇÃO GERAL.....	11
CAPÍTULO 1.....	20
RESUMO.....	20
ABSTRACT.....	21
INTRODUÇÃO.....	21
METODOLOGIA.....	23
RESULTADOS	25
DISCUSSÕES	27
CONCLUSÕES.....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
CAPÍTULO 2.....	34
RESUMO.....	34
ABSTRACT.....	34
INTRODUÇÃO.....	35
METODOLOGIA.....	36
RESULTADOS	39
DISCUSSÕES	42
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
CAPÍTULO 3.....	50
RESUMO.....	50
ABSTRACT.....	51
INTRODUÇÃO.....	51
METODOLOGIA.....	53
RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
CONCLUSÃO GERAL	63
APÊNDICES.....	65

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO GERAL

Figura 1 - Fluxograma de espacialização da dissertação	15
---	----

CAPÍTULO 1

Figura 1 - Representação do bioma Pantanal e seus cursos hídricos.	23
Figura 2 - Variação anual de parâmetros microclimáticos para o bioma Pantanal, a área municipal de Cáceres (AM Cáceres) e perímetro urbano de Cáceres (PU Cáceres) entre o período de 2000 a 2024.....	26
Figura 3 - Concentração anual de material particulado MP _{2,5} (µg/m ³) nos locais Pantanal, área municipal de Cáceres (AM Cáceres) e perímetro urbano de Cáceres (PU Cáceres) entre o período de 2000 a 2024	27

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Apresentação da localização dos municípios no Estado de Mato Grosso, abrangendo sua extensão territorial e presença nos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal.....	37
Figura 2 - Detalhamento da duração total anual, demonstra um aumento no número total de dias que cada cidade passou sob condições de onda de calor.	39
Figura 3 - Demonstração do número de eventos extremos ao longo dos anos.	40
Figura 4 - Sazonalidade, agregando o total de eventos por mês de ambas as estações.	41
Figura 5 - Crescente térmica ao longo de uma onda de calor nos locais analisados.	42

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Mapa de densidade de fumaça ao longo do município de Cáceres, MT entre os dias 10 e 13 de setembro 2024.....	55
Figura 2 - Identificação de focos de queimadas acumulados no Brasil entre os dias 10 de agosto e 10 de setembro de 2024.	56
Figura 3 - Agrupamento dos registros de MP _{2,5} durante o período estudado.	57
Figura 4 - Locais de registro de material particulado (MP _{2,5}).	59

RESUMO GERAL

SOARES VIANA, Cleverton Ricardo. **INTERAÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM CIDADES DO CENTRO-OESTE BRASILEIRO: ESTUDO SOBRE CONFORTO TÉRMICO, ONDAS DE CALOR E POLUENTES ATMOSFÉRICOS**. Cáceres: UNEMAT, 2025. 68p (Dissertação – Mestrado em Ciências Ambientais).

A crise climática global tem impactado negativamente os ecossistemas urbanos e não urbanos, elevando temperaturas, abaixando a umidade e piorando a qualidade do ar – alterações quais favorecem eventos climáticos extremos como as ondas de calor, diminui o conforto térmico humano e aumentam os picos de poluentes atmosféricos. Os perímetros ecotonais tropicais, como o centro-oeste do Brasil, são especialmente vulneráveis a essas transformações microclimáticas e podem ser afetados pela atual crise climática. Os ambientes situados nessas zonas ecotonais, como as do estado de Mato Grosso, estão relativamente mais expostas. Essa vulnerabilidade pode ser atribuída à combinação de fatores geográficos, climáticos e socioeconômicos predominantes nessas regiões. Diante da atual emergência climática enfrentada pela região ecotonal do centro-oeste brasileiro, esta dissertação tem como objetivo analisar a dinâmica microclimática urbana e não urbana, com ênfase na ocorrência de eventos extremos, como as ondas de calor, no conforto bioclimático, e na poluição atmosférica. No Capítulo 1, foram analisados a temperatura, os índices bioclimáticos e os poluentes atmosféricos em áreas urbanas e não urbanas do Bioma Pantanal entre os anos 2000 e 2024. Os resultados indicam um aquecimento da temperatura média anual de 9,4% (de 25,52 °C para 27,96 °C), enquanto a umidade relativa apresentou redução de 16,7% (de 72,61% para 60,55%). Além disso, foram identificados episódios de poluição extrema por MP_{2.5} nos anos de 2005, 2007 e 2020, com picos superiores a 300 µg/m³. No Capítulo 2, foram identificadas ondas de calor ocorridas em dois municípios da região centro-oeste do Brasil: Porto Estrela e Cuiabá, entre os anos de 2008 e 2023. Os resultados indicaram que Cuiabá apresentou a maior ocorrência, com 52 eventos, enquanto Porto Estrela registrou 34. Ao longo dos 15 anos, observou-se em Cuiabá um aumento de aproximadamente 600% no número de eventos. Identificou-se ainda que o pico térmico ocorre entre o quarto e o sexto dia das ondas de calor, atingindo a temperatura máxima de 41,2 °C. O Capítulo 3 teve como objetivo diagnosticar os locais com maior incidência de MP_{2.5}, considerando ambientes abertos e fechados. Os resultados mostraram que em ambientes internos (indoor), a concentração de MP_{2.5} pode ser até quatro vezes superior aos limites recomendados pelos órgãos reguladores brasileiros, enquanto em ambientes externos (outdoor), essa concentração pode ser até 11 vezes maior. Dessa forma, o monitoramento térmico e de poluição atmosférica dos ambientes urbanos se mostra fundamental para entender como a população está se aclimatando à atual crise climática. Diante dos resultados obtidos através desta pesquisa, conclui-se que as áreas urbanas da região ecotonal do centro-oeste brasileiro enfrentam desafios crescentes relacionados ao desconforto térmico, à intensificação das ondas de calor e à elevada concentração de poluentes atmosféricos. A análise integrada dos índices bioclimáticos, das temperaturas de superfície e da poluição por material particulado fino evidencia a urgência de estratégias de adaptação e mitigação, tanto em nível urbano quanto regional. Nesse cenário microclimático emerge uma dinâmica termo-poluidora na qual o aquecimento acentuado e as altas concentrações de material particulado atuam de forma sinérgica, intensificando o estresse térmico e a degradação da qualidade do ar. Compreender essa dinâmica microclimática é importante para o desenvolvimento de políticas públicas eficazes que minimizem os impactos da crise climática sobre a saúde e o bem-estar das populações, principalmente as mais vulneráveis.

Palavras-chave: Crise climática; eventos extremos; conforto climático; poluentes climáticos.

GENERAL ABSTRACT

SOARES VIANA, Cleverson Ricardo. **MICROCLIMATE INTERACTIONS IN CITIES OF THE BRAZILIAN CENTER-WEST: A STUDY ON THERMAL COMFORT, HEAT WAVES, AND AIR POLLUTANTS**. Cáceres: UNEMAT, 2025. 68p (Dissertation for Environmental Sciences Graduate Program).

The global climate crisis has negatively affected both urban and non-urban ecosystems, increasing temperatures, lowering humidity, and worsening air quality – changes that favor extreme climatic events such as heatwaves, reduce human thermal comfort, and intensify peaks of atmospheric pollutants. Tropical ecotonal perimeters, such as those in Brazil's central-west region, are particularly vulnerable to these microclimatic transformations and can be strongly affected by the current climate crisis. Environments located within these ecotonal zones, such as those in the state of Mato Grosso, are relatively more exposed. This vulnerability can be attributed to the combination of geographic, climatic, and socioeconomic factors predominant in these regions. Given the current climate emergency faced by the ecotonal region of the Brazilian central-west, this dissertation aims to analyze the microclimatic dynamics of urban and non-urban environments, with emphasis on the occurrence of extreme events such as heatwaves, on bioclimatic comfort, and on atmospheric pollution. In Chapter 1, air temperature, bioclimatic indices, and atmospheric pollutants were analyzed in urban and non-urban areas of the Pantanal Biome between 2000 and 2024. The results indicate a 9.4% increase in annual mean temperature (from 25.52 °C to 27.96 °C), while relative humidity showed a 16.7% reduction (from 72.61% to 60.55%). Additionally, episodes of extreme PM_{2.5} pollution were identified in the years 2005, 2007, and 2020, with peaks exceeding 300 µg/m³. In Chapter 2, heatwaves were identified in two municipalities of the Central-West region of Brazil: Porto Estrela and Cuiabá, between 2008 and 2023. The results indicated that Cuiabá exhibited the highest occurrence, with 52 events, while Porto Estrela recorded 34. Over the 15-year period, Cuiabá experienced an approximate 600% increase in the number of events. It was also observed that the thermal peak occurs between the fourth and sixth day of the heatwave, reaching a maximum temperature of 41.2 °C. Chapter 3 aimed to diagnose the locations with the highest incidence of PM_{2.5}, considering both indoor and outdoor environments. The results showed that indoor PM_{2.5} concentrations can be up to four times higher than the limits recommended by Brazilian regulatory agencies, while in outdoor environments, concentrations may reach up to 11 times the recommended levels. Thus, thermal and atmospheric pollution monitoring in urban environments is essential to understand how populations are acclimating to the current climate crisis. Based on the results obtained in this research, it is concluded that the urban areas of the ecotonal region of the Brazilian central-west face increasing challenges related to thermal discomfort, intensification of heatwaves, and high concentrations of atmospheric pollutants. The integrated analysis of bioclimatic indices, surface temperatures, and fine particulate pollution highlights the urgent need for adaptation and mitigation strategies at both urban and regional levels. Within this microclimatic scenario, a thermo-polluting dynamic emerges, in which pronounced warming and high concentrations of particulate matter act synergistically, intensifying thermal stress and degrading air quality. Understanding this microclimatic dynamic is essential for the development of effective public policies that minimize the impacts of the climate crisis on the health and well-being of populations, especially the most vulnerable groups.

Keywords: Climate crisis; extreme events; climatic comfort; climatic pollutants.

INTRODUÇÃO GERAL

Por muito tempo cientistas brasileiros vêm alertando para as consequências das mudanças climáticas (Nobre, 2001), e hoje em dia (2025) são mais que evidentes em diversas circunstâncias, com impacto direto nos ecossistemas, sociedade e economia (Barbosa et al., 2025; Sobreira et al., 2025). O contexto climático atual nos demanda atitudes mais severas que tenham impacto no hoje, pois pensar no amanhã nos torna visionários de um futuro incerto (Artaxo, 2025).

A dinâmica climática global tem se tornado cada vez mais complexa e desafiadora de ser compreendida, revelando sinais evidentes da crise ambiental em curso. Eventos extremos, como secas severas (Wang et al., 2025), chuvas torrenciais intensificadas (Hiraga et al., 2025), tornados e furacões devastadores, evidenciam a magnitude do problema, assim como os crescentes registros de mortes e impactos à saúde pública decorrentes dessas ocorrências (Gentile et al., 2025). Diante desse cenário, torna-se imprescindível refletir sobre a capacidade humana de adaptação às mudanças climáticas. Tal adaptação exige um impulso decisivo, cuja origem, momento de início e liderança ainda permanecem incertos. Enquanto isso, a inércia predomina. Contudo, é previsível que, ao atingir diretamente os pilares da economia global, a crise climática exige a implementação de medidas de mitigação antes ignoradas, que finalmente passarão a ocupar o centro das ações estratégicas (Silva et al., 2025).

Os ecossistemas têm sido explorados além de sua capacidade natural de regeneração, na tentativa de sustentar o crescimento populacional e o avanço econômico. No entanto, esses sistemas naturais constituem a base material de toda a economia, e seu esgotamento representa um dos maiores riscos sistêmicos do século XXI (Ludden e Howitt, 2025). O atual modelo produtivo, ao considerar elementos essenciais como o ar, a água e a biodiversidade como externalidades gratuitas, compromete a própria sustentabilidade de sua estrutura. À medida que os recursos naturais se tornam escassos, a cadeia produtiva como um todo tende ao colapso. Nesse contexto, até mesmo os insumos agrícolas, fundamentais para a segurança alimentar global, tornam-se dependentes da estabilidade climática (Voytov, 2024; Ramavather e Bangura, 2025).

No Brasil, observa-se que, ao longo de 23 anos, aproximadamente 8,96% das florestas nativas foram perdidas, enquanto as áreas destinadas à agropecuária cresceram 23% no mesmo intervalo (MapBiomass, 2025). Esse dado evidencia a íntima relação entre economia e ecossistemas, reforçando que a questão não se limita à preservação ambiental, mas envolve também uma lógica de inteligência econômica. Investir na resiliência ecológica significa proteger ativos tangíveis, desde cultivos em larga escala até estruturas urbanas que se mostram cada vez mais vulneráveis diante da intensificação da crise climática (Kapsalis et al., 2019).

Esse avanço da fronteira agropecuária, especialmente no arco do desmatamento que conecta Amazônia e Cerrado, intensifica transformações ecossistêmicas (Lapola et al., 2023). A

combinação entre desmatamento, savanização acelerada e aquecimento global tem prolongado a estação seca, reduzido a precipitação anual e ampliado a ocorrência de extremos térmicos no centro-oeste e na Amazônia (Marengo e Espinoza, 2017). Estudos recentes indicam que a chuva anual pode diminuir em até 44%, enquanto a estação seca pode se alongar em 69%, afetando diretamente a umidade do solo, a vazão dos rios e, consequentemente, a produtividade agrícola e a geração hidrelétrica (Bottino et al., 2024). No Cerrado, projeta-se uma redução de até 33,9% na disponibilidade hídrica até 2050, comprometendo sistemas produtivos e o abastecimento humano (Salmona et al., 2023). Esses efeitos criam um ciclo de seca, incêndios e perda de vegetação, ampliando o risco de aridificação e desertificação em áreas próximas ao arco do desmatamento e demonstrando que a degradação ambiental ameaça tanto a integridade dos ecossistemas quanto a viabilidade econômica das regiões afetadas (Marengo et al., 2018).

Mediante esse entendimento de uso e ocupação do solo, nas últimas décadas o bioma Pantanal tem apresentado sinais crescentes de aridificação, resultado de uma combinação entre perda da vegetação natural, mudanças climáticas regionais, variações hidrológicas e intensificação antrópica em seu entorno (Lázaro e Oliveira-Júnior et al., 2020; Caballero et al., 2025). Estudos recentes indicam que a redução da vazão dos rios, a alteração do regime de cheias e o aumento da evapotranspiração atmosférica têm transformado áreas tradicionalmente alagáveis em ambientes mais secos e suscetíveis à degradação (De Oliveira Aparecido et al., 2020; D’Acunha et al., 2024). Esse processo compromete diretamente a funcionalidade ecológica do bioma (Ivory et al., 2019), reduzindo sua capacidade de atuar como regulador térmico e hidrológico regional (Thielen et al., 2020). A aridificação eleva o risco e a intensidade de incêndios, como observado em 2020 (Libonati et al., 2022), quando 31% do Pantanal foi queimado matando cerca de 17 milhões de vertebrados (Tomas et al., 2021), mas amplificam a liberação de particulados finos para a atmosfera (Kumar et al., 2022; Caumo et al., 2022).

Assim, a intensificação do uso do solo reflete-se diretamente nos centros urbanos, onde a ocupação ocorre de maneira desordenada e incisiva, muitas vezes sem a devida compreensão do ambiente, do clima e de suas variabilidades locais (Kalnay e Cai, 2003; Masroor et al., 2022). Quando a urbanização é realizada sem um planejamento prévio adequado, surgem desafios que hoje se tornam cada vez mais evidentes – entre eles, o aumento das ilhas de calor (Matsumoto et al., 2019) e a degradação da qualidade do ar, agravada pela poluição proveniente dos veículos automotores (Williams, 1987; Zhan et al., 2023). Outro aspecto preocupante é o adensamento populacional nos perímetros urbanos, que contribui para desigualdades habitacionais e para a escassez de recursos essenciais, como o abastecimento básico e o acesso à água tratada (IBGE, 2022).

Ao pensar em longo prazo às décadas de 2020, 2030 e 2040 tendem a ser especialmente desafiadoras no enfrentamento da crise climática nos centros urbanizados (IPCC, 2014; Long et

al., 2020). A compreensão das transformações em curso pode ser um processo lento, o que dificulta a tomada de decisões estratégicas (Kunreuther et al., 2013). Torna-se cada vez mais evidente que os centros urbanos precisam atualizar suas demandas urbanísticas, incorporando medidas de adaptação verde (Pancewicz et al., 2024). Isso se reflete, por exemplo, na promoção e adaptação de parques urbanos, na substituição de superfícies pavimentadas por áreas permeáveis e respiráveis, e na restauração de corpos hídricos urbanos – ações fundamentais para tornar as cidades mais resilientes às mudanças climáticas (Fini et al., 2017).

Até que ponto o ser humano é capaz de suportar as variações climáticas atuais? O conforto térmico nos ambientes urbanizados é, de fato, alcançado? Compreender que estamos cada vez mais expostos aos efeitos da crise climática nos leva à urgência de implementar medidas de aclimação mais efetivas em um curto intervalo de tempo (Krüger et al., 2017). O conforto climático deve ser um direito democrático, assegurando que todos tenham condições adequadas para manter a saúde e que os impactos da crise climática interfiram o mínimo possível em seu desenvolvimento (Antonioni et al., 2024). Ao mesmo tempo em que a população clama por soluções que melhorem sua qualidade de vida, também se observa um agravamento do estado mental coletivo — a ansiedade climática torna-se cada vez mais evidente, configurando-se como um problema de saúde pública (Chen et al., 2025).

Com isso, a combinação de temperaturas elevadas e material particulado oriundo das queimadas no Pantanal tem impactos diretos nos ambientes urbanos, especialmente em cidades localizadas em zonas de transição ecotonal (Novoa et al., 2020; Santos et al., 2025). Estudos mostram que, durante e após eventos de incêndio, há aumento significativo de poluentes atmosféricos como $MP_{2.5}$, MP_{10} , SO_2 , NO_2 e ozônio, que permanecem elevados por vários dias, agravando a qualidade do ar (De moura et al., 2024; Gonçalves et al., 2025; Souto-Oliveira et al., 2023). Nesse sentido, a compreensão da aridificação do Pantanal e de suas repercussões termo-poluidoras torna-se essencial para interpretar os impactos crescentes observados nas cidades da região centro-oeste, onde a urbanização frequentemente ocorre sem considerar a dinâmica ambiental regional. Diante desse cenário, o Capítulo 1 tem como objetivo compreender a variação microclimática e os níveis de poluentes atmosféricos de áreas urbanas e não urbanas do bioma Pantanal, visando compreender a dinâmica termo-poluidora dessa região.

A crise climática influencia diretamente a ocorrência de eventos extremos, como as ondas de calor (Luber et al., 2008), e os centros urbanos estão entre os mais impactados por esses fenômenos, que podem elevar as temperaturas em até cinco graus acima da média habitual (IPCC, 2021). O ecossistema urbano sofre intensamente ao ser exposto, por longos períodos, a temperaturas elevadas (Dai et al., 2024), afetando diretamente a saúde e o bem-estar da população residente (Paolo et al., 2023). Diante desse cenário, torna-se essencial compreender como a urbanização tem contribuído para a intensificação desses eventos climáticos extremos e de que

forma a população poderá se aclimatar (Lin et al., 2020). Assim, o Capítulo 2 busca evidenciar a ocorrência de eventos climáticos extremos, com ênfase na análise de ondas de calor em centros urbanos de diferentes escalas.

Mesmo que as condições de conforto climático estejam dentro dos parâmetros ideais e que a temperatura não atinja níveis extremos, os habitantes dos centros urbanos não estão totalmente isentos dos impactos das mudanças climáticas. Eventos associados à crise climática continuam a ocorrer, afetando diretamente a saúde da população urbana, como é o caso da poluição atmosférica (Bian et al., 2024). Essa poluição pode ter origem em queimadas intensas, que geram densas nuvens de fumaça (De Moura et al., 2024), as quais são transportadas para os centros urbanos (Wu et al., 2023). Nesse contexto, o Capítulo 3 evidenciou um episódio crítico de queimadas no bioma Amazônia, que resultou na formação de uma nuvem de poluentes atmosféricos que alcançou regiões do bioma Pantanal. Assim, buscamos compreender como os níveis de poluição atmosférica se distribuem e se concentram em diferentes ambientes urbanos.

Esta pesquisa busca responder à pergunta: Como a interação entre variação térmica e poluição atmosférica afetam o microclima e a qualidade do ar em uma zona de transição ecotonal tropical? Seu objetivo principal é analisar a dinâmica microclimática ambiental urbana e não urbana de um perímetro ecotonal, evidenciando eventos extremos como ondas de calor e poluição atmosférica, e suas implicações para o conforto térmico e qualidade do ar. Para isso, partimos de três hipóteses:

1. O bioma Pantanal em ambientes urbanos e não urbanos apresentam amplitudes de temperatura e poluentes atmosféricos que afetam o conforto térmico e a qualidade do ar.
2. As ondas de calor na região centro-oeste do Brasil têm se tornado mais frequentes e intensas nas últimas décadas, contribuindo para a elevação da temperatura média regional e indicando a tendência de agravamento dos eventos extremos nas próximas décadas.
3. A presença de nuvens de fumaça, resultantes principalmente de queimadas, eleva significativamente as concentrações de material particulado fino ($MP_{2,5}$), deteriorando a qualidade do ar em ambientes internos e externos com potenciais riscos à saúde humana.

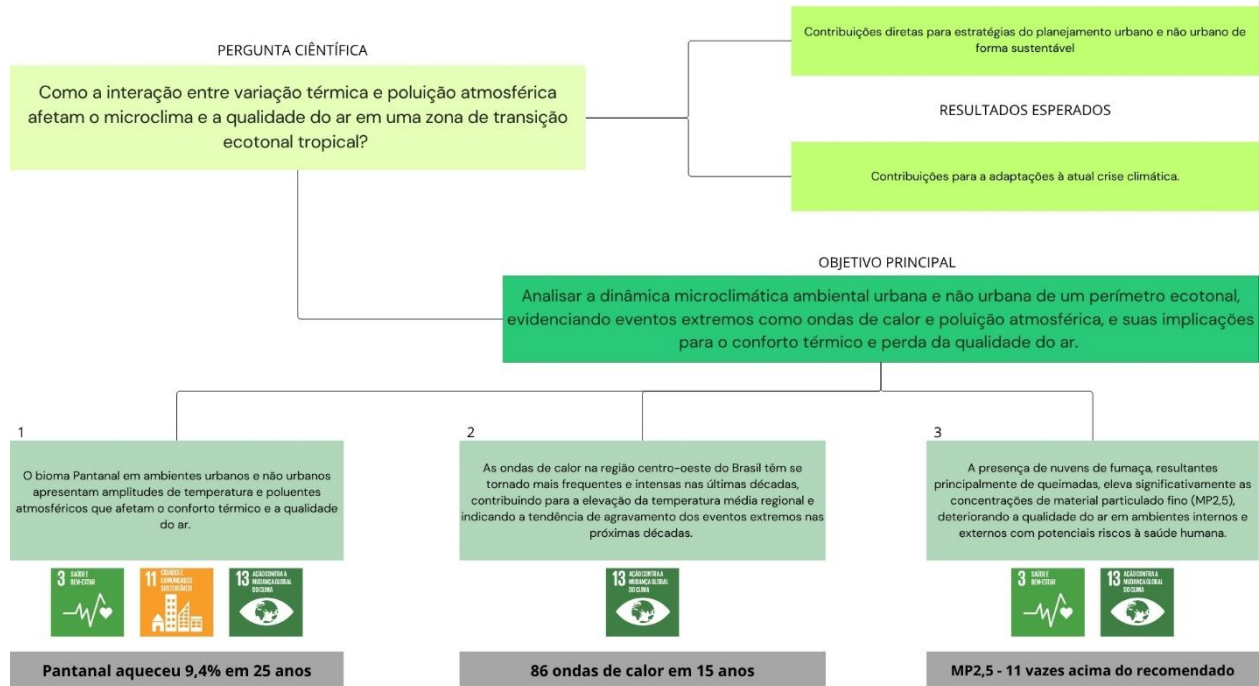
Essa investigação é essencial para compreender as interações entre as variáveis microclimáticas (temperatura e umidade) visando compreender a dinâmica térmica e poluição atmosférica, fatores intimamente ligados ao movimento de uso e ocupação do solo e que definem a saúde dos ecossistemas urbanos e não urbanos e de suas populações. Além disso, o estudo se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial:

- ODS 3 (Saúde e Bem-Estar): Meta 3.D, que reforça a redução de riscos à saúde global, como os causados por poluição e estresse térmico.
- ODS 11 (Cidades Sustentáveis): Meta 11.6, que busca equilibrar o ambiente urbano, minimizando impactos ambientais.

- ODS 13 (Ação Contra a Mudança Climática): Metas 13.1 e 13.3, que visam fortalecer a resiliência a riscos climáticos e desastres naturais.

Ao integrar análises climáticas, urbanísticas e socioambientais, este trabalho contribui para estratégias de planejamento urbano sustentável e adaptação às mudanças climáticas, garantindo ambientes que possam corresponder de forma urgente à crise climática.

Figura 1. Fluxograma de espacialização dissertação, com a pergunta científica, o objetivo principal e os resultados esperados. Os números 1, 2 e 3 correspondem as hipóteses científicas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

REFERÊNCIAS

ANTONIOU, N.; MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B.; NEOPHYTOU, M. On the impact of climate change on urban microclimate, thermal comfort, and human health: Multiscale numerical simulations. **Building and Environment**, v. 260, p. 111690, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111690>.

ARTAXO, P. COP-30 e o agravamento da crise climática - caminhos para a construção de uma sociedade sustentável. **Estudos Avançados**, v. 39, n. 114, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/vwHzCqyLWNxtFD9j9gwjZdK/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 19 nov. 2025.

BARBOSA, M. et al. Burning In Pantanal Driven By Wetland Degradation And Lower Precipitation. In: **EGU GENERAL ASSEMBLY 2025**, 2025, Vienna, Austria. EGU25-18657. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-18657>. Acesso em: 19 nov. 2025.

BIAN, Z.; REN, C.; WANG, D.; CAO, S.-J. Spatial-temporal analysis of urban air pollution related exposure and health impacts: Driving human-centered regulation and control. **Urban Climate**, v. 58, p. 102161, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102161>.

BOTTINO, M. et al. Amazon savannization and climate change are projected to increase dry season length and temperature extremes over Brazil. **Scientific Reports**, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55176-5>.

CABALLERO, C. et al. Decadal hydroclimatic changes in the Pantanal, the world's largest tropical wetland. **Scientific Reports**, v. 15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01980-6>.

CAUMO, S. et al. Human risk assessment of ash soil after 2020 wildfires in Pantanal biome (Brazil). **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 15, p. 2239–2254, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01248-2>.

CHEN, D.-D.; TU, J.-H.; LING, K.-N.; JIN, X.-H.; HUANG, H.-Y. Climate change and suicide epidemiology: a systematic review and meta-analysis of gender variations in global suicide rates. **Frontiers in Public Health**, v. 12, p. 1463676, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1463676>.

D'ACUNHA, B. et al. Changes in evapotranspiration, transpiration and evaporation across natural and managed landscapes in the Amazon, Cerrado and Pantanal biomes. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109875>.

DAI, X. et al. Extreme weather characteristics and influences on urban ecosystem services in Wuhan Urban Agglomeration. **Geography and Sustainability**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.06.003>.

DE MOURA, F. R. et al. In the line of fire: Analyzing burning impacts on air pollution and air quality in an Amazonian city, Brazil. **Atmospheric Pollution Research**, v. 15, n. 4, p. 102033, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.102033>.

DE OLIVEIRA APARECIDO, L. et al. Climate changes and their influences in water balance of Pantanal biome. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 143, p. 659-674, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03445-4>.

FINI, A. et al. Nature based solutions to mitigate soil sealing in urban areas: Results from a 4-year study comparing permeable, porous, and impermeable pavements. **Environmental Research**, v. 156, p. 443–454, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.032>.

GENTILE, E. S. et al. Response of Extreme North Atlantic Midlatitude Cyclones to a Warmer Climate in the GFDL X-SHIELD Kilometer-Scale Global Storm-Resolving Model. **Geophysical Research Letters**, v. 52, n. 2, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2024gl112570>.

GONÇALVES, A. et al. Additive effect of wildfires on hospital admission in the Pantanal wetland, Brazil. **Scientific Reports**, v. 15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13257-z>.

HIRAGA, Y.; TAHARA, R.; MEZA, J. A methodology to estimate Probable Maximum Precipitation (PMP) under climate change using a numerical weather model. **Journal of Hydrology**, v. 652, p. 132659, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132659>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama das cidades**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>. Acesso em: 4 abr. 2025.

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- IVORY, S. J. et al. Vegetation, rainfall, and pulsing hydrology in the Pantanal, the world's largest tropical wetland. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 12, p. 124017–124017, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab4ffe/meta>. Acesso em: 19 nov. 2025.
- KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**, v. 423, p. 528–531, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature01675>.
- KAPSALIS, V. C.; KYRIAKOPOULOS, G. L.; ARAVOSSIS, K. G. Investigation of Ecosystem Services and Circular Economy Interactions under an Inter-organizational Framework. **Energies**, v. 12, n. 9, p. 1734, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12091734>.
- KRÜGER, E. L. et al. Short- and long-term acclimatization in outdoor spaces: Exposure time, seasonal and heatwave adaptation effects. **Building and Environment**, v. 116, p. 17–29, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.001>.
- KUMAR, S. et al. Changes in land use enhance the sensitivity of tropical ecosystems to fire-climate extremes. **Scientific Reports**, v. 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05130-0>.
- KUNREUTHER, H.; WEBER, E. U. Aiding Decision-Making to Reduce the Impacts of Climate Change. **SSRN Electronic Journal**, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2368551>.
- LAPOLA, D. et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, v. 379, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>.
- LÁZARO, W. et al. Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s2179-975x7619>.
- LIBONATI, R. et al. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 1, p. 015005, 2022.
- LIN, L. et al. Contribution of urbanization to the changes in extreme climate events in urban agglomerations across China. **Science of the Total Environment**, v. 744, p. 140264, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140264>.
- LUBER, G.; MCGEEHIN, M. Climate Change and Extreme Heat Events. **American Journal of Preventive Medicine**, v. 35, n. 5, p. 429–435, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021>.

LUDDEN, J. N.; HOWITT, C. Ten key priorities, innovations and actions to mitigate the climate crisis. **National Institute Economic Review**, v. 266, p. 47–54, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/nie.2024.9>.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, 2015. Disponível em: [suspicious link removed]. Acesso em: 19 nov. 2025.

MARENGO, J. et al. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>.

MASROOR, M. et al. Assessing the Influence of Land Use/Land Cover Alteration on Climate Variability: An Analysis in the Aurangabad District of Maharashtra State, India. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 642, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14020642>.

MATSUMOTO, K. Climate change impacts on socioeconomic activities through labor productivity changes considering interactions between socioeconomic and climate systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 216, p. 528-541, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.127>.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias estratégicas**, v. 12, p. 239-258, 2001.

NOVOA, V. et al. Coastal Wetlands: Ecosystems Affected by Urbanization?. **Water**, v. 12, n. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030698>.

PANCEWICZ, A.; KURIANOWICZ, A. Urban Greening in the Process of Climate Change Adaptation of Large Cities. **Energies**, v. 17, n. 2, p. 377, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17020377>.

PAOLO, C. et al. Is climate change affecting mental health of urban populations? **Current Opinion in Psychiatry**, v. 36, n. 3, p. 213–218, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/ycp.0000000000000859>.

PLATAFORMA - MAPBIOMAS BRASIL. **Cobertura e uso do solo no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura>. Acesso em: 3 abr. 2025.

SALMONA, Y. et al. A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. **Sustainability**, v. 15, n. 5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15054251>.

SANTOS, M. C. et al. Análise da qualidade do ar em 15 municípios de Mato Grosso: impactos potenciais na saúde humana. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 36, n. 21, p. 728-749, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v36i21.18693>.

SILVA, B. L. et al. Between catastrophes and politics: Unraveling the web of disasters, climate change, and public strategies for a sustainable future. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 118, p. 105210, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105210>.

SOBREIRA, E. O. J. et al. Wildfires and their toll on Brazil: Who's counting the cost? **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 23, n. 3, p. 214–217, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2025.06.003>.

SOUTO-OLIVEIRA, C. et al. Impact of extreme wildfires from the Brazilian Forests and sugarcane burning on the air quality of the biggest megacity on South America. **The Science of the Total Environment**, 163439, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163439>.

THIELEN, D. et al. Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. **PLoS ONE**, v. 15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227437>.

TOMAS, W. et al. Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02844-5>.

VOYTOV, N. The formation of ecosystems and their impact on economic growth. **Procedia Computer Science**, v. 242, p. 100–107, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.08.240>.

WANG, S. et al. Global anthropogenic effects on meteorological—hydrological—soil moisture drought propagation: Historical analysis and future projection. **Journal of Hydrology**, v. 653, p. 132755, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132755>.

WILLIAMS, M. L. The impact of motor vehicles on air pollutant emissions and air quality in the UK — An overview. **Science of the Total Environment**, v. 59, p. 47–61, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(87\)90430-x](https://doi.org/10.1016/0048-9697(87)90430-x).

ZHAN, C. et al. Impacts of urbanization on air quality and the related health risks in a city with complex terrain. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 23, n. 1, p. 771–788, 2023. <https://doi.org/10.5194/acp-23-771-2023>.

CAPÍTULO 1

ARTIGO EM PREPARAÇÃO

O novo cenário microclimático do Pantanal: uma análise temporal da dinâmica termo-poluidora

The new microclimatic scenario of the Pantanal: a temporal analysis of thermo-pollutant dynamics

Cleverson Ricardo Soares Viana

Maísa Consuelo dos Santos

Daiana Ferreira Dias

Wilkinson Lopes Lazaro

Ernandes Sobreira Oliveira Junior

RESUMO

O bioma Pantanal vem passando por transformações microclimáticas aceleradas, marcadas por aquecimento progressivo, aridificação e aumento da poluição atmosférica, fatores que comprometem a resiliência do ecossistema e a saúde pública. Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi quantificar as tendências da temperatura do ar, da umidade relativa e da concentração de material particulado fino (MP_{2.5}) no período de 2000 a 2024, abrangendo três escalas de análise: Bioma Pantanal, Área Municipal e Perímetro Urbano de Cáceres, Mato Grosso. Para tanto, foram utilizados dados de reanálise do ERA5 (para temperatura e umidade) e produtos do sensor MODIS (para material particulado). Os resultados indicam um aquecimento da temperatura média anual de 9,4% (de 25,52 °C para 27,96 °C), enquanto a umidade relativa apresentou redução de 16,7% (de 72,61% para 60,55%). Além disso, foram identificados episódios de poluição extrema por MP_{2.5} nos anos de 2005, 2007 e 2020, com picos superiores a 300 µg/m³. Esses resultados evidenciam a existência de uma dinâmica termo-poluidora, na qual o aquecimento acentuado e as altas concentrações de material particulado atuam de forma sinérgica, intensificando o estresse térmico e a degradação da qualidade do ar. Ao longo dos 24 anos analisados, observou-se uma tendência crescente dessa interação, que configura uma nova e crítica condição ambiental para o Pantanal e Cáceres, com sérias implicações para a saúde humana e para a integridade ecológica da região.

Palavras-chave: Crise climática; vulnerabilidade ambiental; estresse térmico; áreas úmidas.

ABSTRACT

The Pantanal biome has been undergoing accelerated microclimatic transformations, marked by progressive warming, aridification, and increased atmospheric pollution—factors that compromise ecosystem resilience and public health. In this context, the objective of this study was to quantify trends in air temperature, relative humidity, and fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations from 2000 to 2024, encompassing three analytical scales: the Pantanal Biome, the Municipal Area, and the Urban Perimeter of Cáceres, Mato Grosso. To this end, ERA5 reanalysis data (for temperature and humidity) and MODIS sensor products (for particulate matter) were used. The results indicate a 9.4% increase in mean annual temperature (from 25.52 °C to 27.96 °C), while relative humidity declined by 16.7% (from 72.61% to 60.55%). Additionally, extreme PM_{2.5} pollution episodes were identified in 2005, 2007, and 2020, with peaks exceeding 300 µg/m³. These findings reveal the presence of a thermo-pollutant dynamic in which pronounced warming and elevated particulate concentrations act synergistically, intensifying thermal stress and degrading air quality. Over the 24-year period analyzed, a growing trend of this interaction was observed, characterizing a new and critical environmental condition for the Pantanal and Cáceres, with serious implications for human health and ecological integrity.

Keywords: Climate crisis; environmental vulnerability; thermal stress; wetlands.

INTRODUÇÃO

O Pantanal, um dos ecossistemas de zonas úmidas mais importantes do planeta, está sob ameaça aguda de uma crise climática acelerada (Junk et al., 2014; Tomas et al., 2019). Eventos climáticos extremos, como as secas severas e os incêndios florestais de grande escala ocorridos em 2020, expuseram a vulnerabilidade do bioma, resultando na perda da biodiversidade e na degradação dos serviços ecossistêmicos (Tomas et al., 2021). Em conjunto o município de Cáceres/MT, que está localizado ao norte do Pantanal, representa uma área estratégica no âmbito dos processos ecológicos naturais e das pressões antrópicas crescentes como as pastagens e cultivo de soja (Galvanin et al., 2019; Schulz et al., 2019).

Assim, emerge um cenário pessimista no Pantanal e no município de Cáceres, marcado pela interação entre o aquecimento progressivo (Thielen et al., 2020), perda de massa d'água (Lázaro e Oliveira-Junior et al., 2020) e queimadas intensas (Barbosa et al., 2022) que fomentam a poluição atmosférica, quando combinadas, não apenas geram impactos diretos à saúde da população, mas também implicam em custos públicos significativos (Santos et al., 2025; Sobreira et al., 2025). E ao relacionar esses estressores ambientais, com a redução da precipitação, o aumento da evapotranspiração – o processo de aridificação está cada vez mais eminente nesses ambientes (IPCC, 2021; Marengo et al., 2021).

O aquecimento e a aridificação criam condições propícias para a ocorrência e propagação de incêndios florestais, que liberam grandes quantidades de material particulado ($MP_{2,5}$) e outros poluentes na atmosfera (Da Silva et al., 2018). Esses poluentes podem, por sua vez, alterar o balanço de radiação e os processos de formação de nuvens, potencialmente intensificando anomalias de temperatura e modificando os regimes de precipitação em escalas local e regional (Artaxo et al., 2005). A interação desses fatores pode resultar em uma dinâmica termo-poluidora, caracterizada pela sinergia entre temperaturas elevadas e poluição do ar, que amplifica os impactos ambientais e climáticos na região.

Estudos recentes indicam um aumento significativo nas temperaturas médias e na frequência de ondas de calor nas regiões centrais do Brasil, com projeções de intensificação desses eventos nas próximas décadas (Hansen et al., 2013; Marengo et al., 2016). Simultaneamente, a poluição atmosférica oriunda da queima de biomassa, representa um grave risco à saúde pública, associada a um aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares na população local (Wu et al., 2023). Assim, o Pantanal e o município de Cáceres se tornam refém dessas mudanças ambientais – gerando uma inconsistência da dinâmica termo-poluidora da região (Louzada et al., 2021). Ainda ocasionando alterações no pulso de inundação, que se torna mais fraco e marcado por estações secas mais longas e severas, impactando diretamente a estrutura e o funcionamento do ecossistema (Alho, 2008; Junk et al., 2014).

Entre 2019 e 2020, a região enfrentou a pior seca dos últimos 80 anos, caracterizada por níveis historicamente baixos dos rios e pela ocorrência de incêndios recordes (Barbosa et al., 2022; Marques et al., 2021; Marengo et al., 2021; Silva et al., 2024). Esse evento extremo evidencia a vulnerabilidade do sistema hidrológico local e antecipa um cenário preocupante, já que modelos climáticos projetam o aumento da frequência e da severidade das secas até o final do século (Silva et al., 2024). Diante disso, há um risco crescente de recorrência desses eventos e de intensificação do processo de aridificação (Thielen et al., 2020). A perda de cobertura vegetal e a expansão das fronteiras agrícolas atuam de forma sinérgica nesse contexto, agravando ainda mais a degradação ambiental — especialmente nas áreas menos sujeitas às inundações, que perdem gradualmente sua capacidade de resiliência ecológica (Guerra et al., 2020; Marques et al., 2021).

De forma integrada, todos esses fatores interagem com a variação microclimática do Pantanal e de Cáceres, gerando uma retroalimentação entre o aquecimento, a aridificação e a poluição atmosférica, que intensifica os extremos térmicos e reduz a resiliência ambiental da região (Marques e Rodriguez, 2022). Essa interação favorece o desequilíbrio dos ecossistemas, compromete o conforto térmico urbano e amplia os riscos à saúde humana, evidenciando a urgência de estratégias integradas de monitoramento climático e gestão ambiental voltadas à mitigação desses impactos (Krüger et al., 2017; Antoniou et al., 2024).

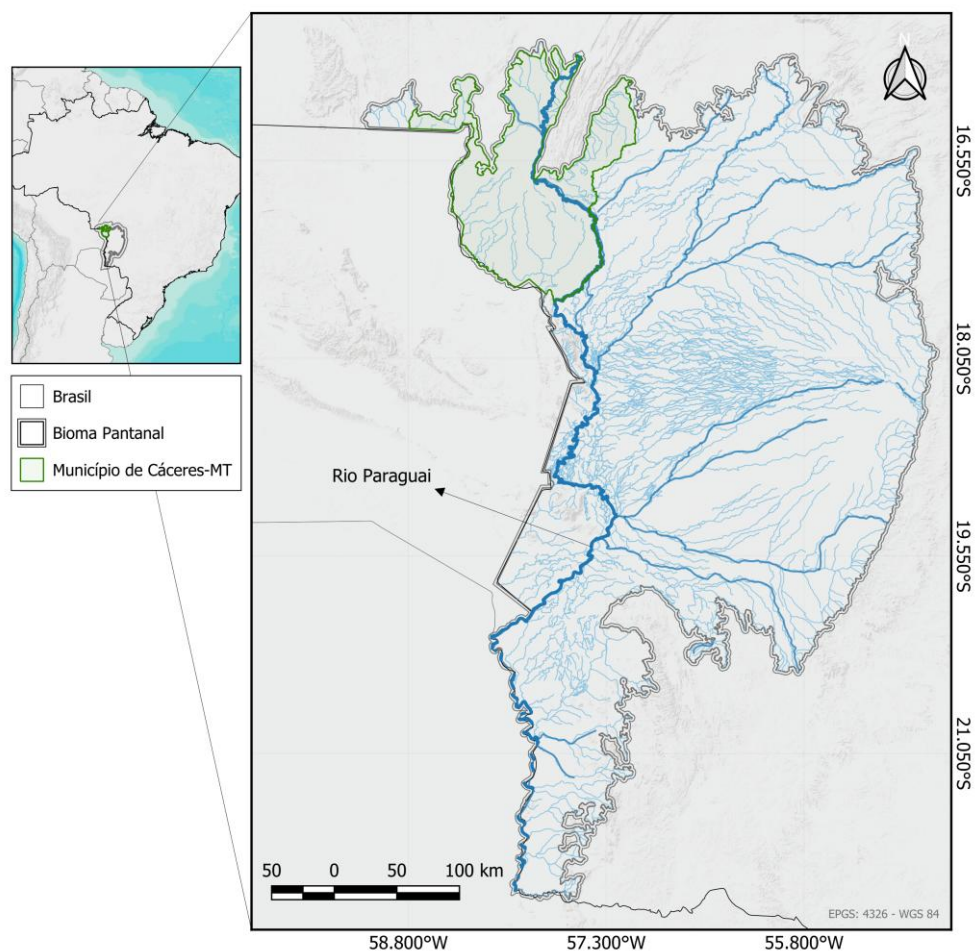
Apesar da crescente preocupação, a quantificação integrada das mudanças microclimáticas e da poluição atmosférica no Pantanal e de Cáceres ainda é incipiente. A análise de séries temporais longas, que permita identificar tendências e anomalias, é fundamental para subsidiar a tomada de decisão e o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação (Vachiano et al., 2021). Nesse contexto, este estudo objetiva analisar a evolução temporal da temperatura do ar, umidade relativa, índices bioclimáticos (calor e desconforto térmico) e concentrações de poluentes atmosféricos ($MP_{2,5}$) em três ambientes: o bioma Pantanal, a área municipal e perímetro urbano de Cáceres-MT, entre os anos de 2000 e 2024.

METODOLOGIA

Área de estudo

O estudo foi conduzido em três escalas de análise: o bioma Pantanal, a área municipal e o perímetro urbano de Cáceres, Mato Grosso (Figura 1). Cáceres é um município estratégico, cujo território ocupa aproximadamente 10% de toda área bioma Pantanal - que historicamente sofre com os impactos de queimadas e variações climáticas (Silva e Abdon, 1998; Rossetto e Girardi, 2012).

Figura 1. Representação do bioma Pantanal e seus cursos hídricos. Observa-se em contorno verde o município de Cáceres, Mato Grosso.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Obtenção de dados

Foram utilizadas séries temporais de 1º de janeiro de 2000 a 31 de dezembro de 2024 para as variáveis de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e material particulado fino (MP_{2,5}, em µg/m³).

Os dados de temperatura e umidade foram obtidos a partir do Centro Europeu de Previsão de Tempo a Médio Prazo (ECMWF) com a reanálise ERA5-Land (Copernicus, 2022). Esse conjunto de dados apresenta resolução espacial de 0,1° × 0,1° (Yan et al., 2021) e fornece estimativas a 2 metros acima da superfície do solo (Munõz-Sabater et al., 2021). A variável temperatura foi originalmente expressa em Kelvin (K), sendo posteriormente convertida para graus Celsius (°C) conforme a equação:

$$T_{(^{\circ}C)} = T_{(K)} - 273,15$$

Onde: $T_{(K)}$ representa a temperatura do ar em Kelvin e $T_{(^{\circ}C)}$ a temperatura convertida para graus Celsius.

Os dados de poluição atmosférica foram derivados de produtos de Sensoriamento Remoto. Utilizou-se a Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD) do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que serve como um proxy para a concentração de material particulado na coluna de ar, sendo particularmente sensível a emissões de queimadas (Christopher et al., 2020). Os dados de AOD foram processados e correlacionados com medições de superfície para estimar as concentrações de MP_{2,5} aplicando-se um fator empírico de conversão:

$$AOD = PM_{2.5} H f(RH) \frac{3 Q_{ext,dry}}{4 \rho r_{eff}} = PM_{2.5} H S$$

Onde: $f(RH)$ representa a razão entre os coeficientes de extinção nas condições ambiente e seca; ρ é a densidade de massa do aerossol ($g\ m^{-3}$); $Q_{ext,dry}$ corresponde à eficiência de extinção de Mie em condições secas; e r_{eff} é o raio efetivo das partículas. O termo S indica a eficiência de extinção específica ($m^2\ g^{-1}$) do aerossol sob condições de umidade relativa ambiente.

Índices bioclimáticos

Após a coleta dos dados de temperatura e umidade, foram calculados dois índices bioclimáticos pré-estabelecidos, visando avaliar o índice de calor proposto por Steadman, (1979) e índice de desconforto térmico proposto por Thom (1959) ajustado para as regiões tropicais por Santos (2011). nas áreas estudadas. Os quadros 1 e 2 representam a classificação dos índices bioclimáticos (IC e IDT). As fórmulas utilizadas foram:

Índice de Calor (IC):

$$IC = -8,7847 + 1,6114 \cdot T - 0,012308 \cdot T^2 + 2,3387 \cdot U - 0,01612 \cdot T \cdot U$$

Onde: T é temperatura do ar em °C e U representa a umidade relativa do ar em %.

Índice de Desconforto Térmico (IDT):

$$IDT = T - (0,55 - 0,0055 \cdot U) \cdot (T - 14,5)$$

Onde: T corresponde a temperatura do ar em °C e U é a umidade relativa do ar em %

Processamento e análise dos dados

Após a coleta, os dados foram dispostos em planilhas do Excel®. Realizou-se uma conferência manual dos dados para identificar e corrigir possíveis inconsistências ou falhas técnicas. Para a análise da estatística descritiva, utilizou-se a linguagem de programação Python, com uso da biblioteca Pandas para organização dos dados em estruturas tabulares e Seaborn para a geração de gráficos.

RESULTADOS

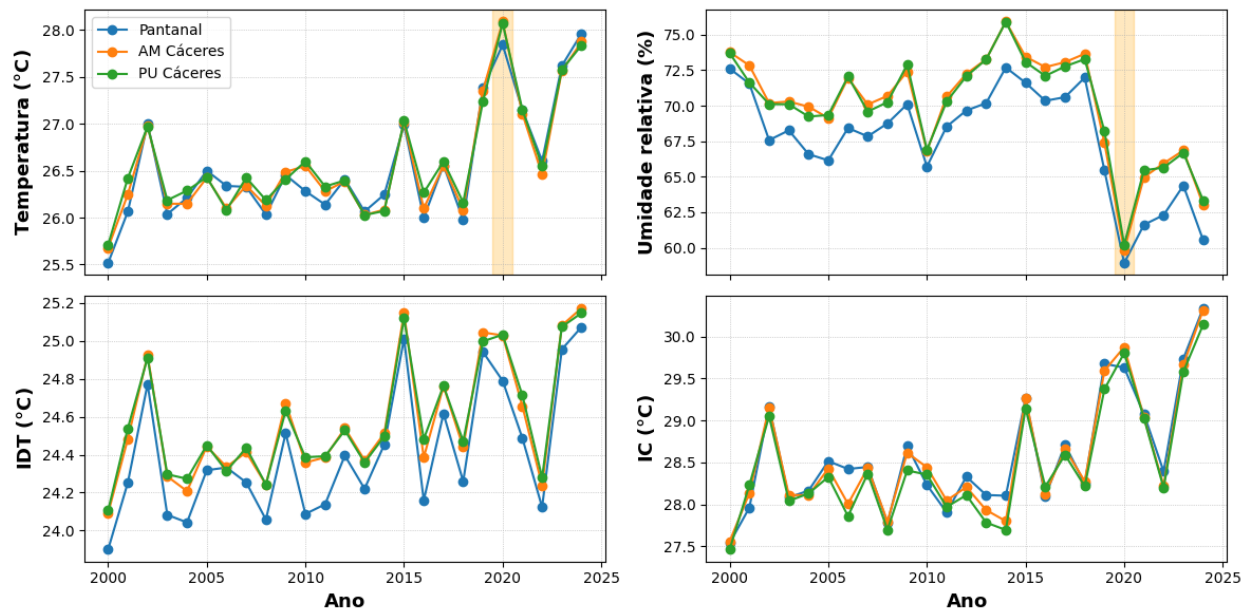
Variáveis microclimáticas e índices bioclimáticos

Os resultados obtidos evidenciam um aumento das temperaturas médias do ar no bioma Pantanal ao longo das últimas duas décadas. A temperatura média anual na região elevou-se de 25,52 °C em 2000 para 27,96 °C em 2024, correspondendo a um acréscimo de 9,4%. Essa tendência de aquecimento é contínua e intensificou-se a partir de 2015, quando começaram a ser registrados os maiores valores médios a partir de 27°C. Em consonância, a umidade relativa média anual no Pantanal sofreu uma redução, passando de 72,61% para 60,55% no mesmo intervalo — uma queda de 16,7%.

Na área municipal de Cáceres, foi observada uma elevação da temperatura média anual de 25,68 °C (2000) para 27,88 °C (2024), um aumento de 8,6%. Já a umidade relativa média caiu de 73,77% para 63,03% no mesmo período, totalizando uma redução de aproximadamente 14,5%. O impacto combinado do aumento térmico e da diminuição da umidade refletiu-se diretamente nos índices de desconforto térmico (IDT) e no índice de calor (IC). O IDT médio anual, que reflete a sensação de desconforto térmico humano, subiu de 24,09 °C para 25,17 °C, enquanto o IC apresentou um aumento mais pronunciado, passando de 27,56 °C para 30,31 °C, indicando uma elevação de 10%. Vale destacar que, nos anos de 2023 e 2024, os valores máximos de IC chegam à 34 °C, configurando condições de extremo desconforto e potencial risco à saúde.

Ao especificar no perímetro urbano de Cáceres, é observado um aumentando de 25,71 °C (2000) para 27,84 °C (2024), representando um acréscimo de 8,3%. A umidade relativa média decresceu de 73,71% para 63,35%, redução estimada em 14,1%. Os valores médios de IDT passaram de 24,10 °C para 25,15 °C, enquanto o IC médio anual saltou de 27,46 °C para 30,14 °C, indicando um ambiente progressivamente mais quente e seco, especialmente no período pós-2015 (Figura 2).

Figura 2. Variação anual de parâmetros microclimáticos para o bioma Pantanal, a área municipal de Cáceres (AM Cáceres) e perímetro urbano de Cáceres (PU Cáceres) entre o período de 2000 a 2024. A faixa em amarelo destaca os picos máximos de temperatura e mínimos de umidade, ocorridos no ano de 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Poluição atmosférica

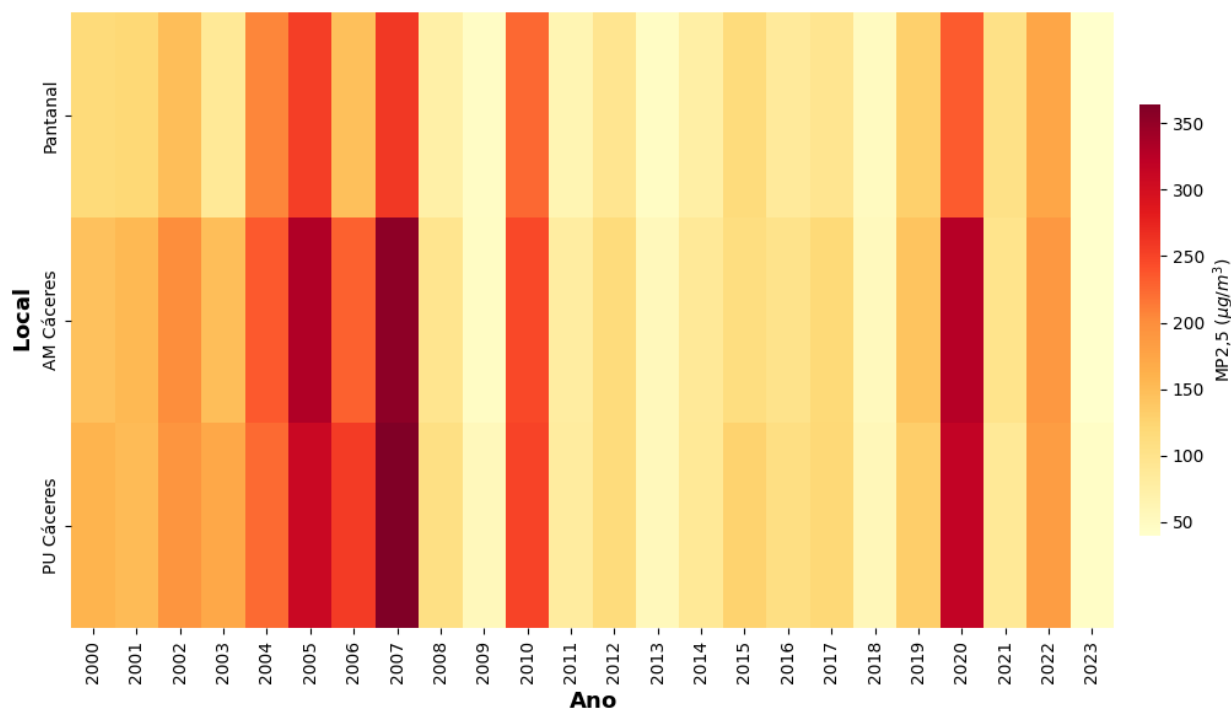
A avaliação das concentrações anuais de material particulado fino (MP_{2.5}) entre os anos de 2000 e 2023 nas três regiões analisadas – no Bioma Pantanal, na área municipal de Cáceres e perímetro urbano de Cáceres e evidencia episódios recorrentes de deterioração da qualidade do ar, com picos expressivos de poluição atmosférica especialmente associados ao período seco da região.

No bioma Pantanal, embora se espere menor influência antrópica direta, os valores máximos de MP_{2.5} ocorreram em 2007 (259,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido de 2005 (253,70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e 2020 (234,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), demonstrando que o bioma não está isolado dos efeitos regionais de queimadas e transporte atmosférico de partículas.

Nos três locais, os anos de 2005, 2007 e 2020 registraram os maiores valores médios anuais de MP_{2.5}, com concentrações superiores a 64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores bastante elevados quando comparados aos mínimos históricos observados em 2009 e 2013. Na área municipal de Cáceres, a maior média foi registrada em 2007, com 79,79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, representando um aumento de aproximadamente 178,6% em relação a 2013, que apresentou a menor média da série com 28,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Já os picos notáveis ocorreram em 2020 (327,95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e 2005 (331,12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

No perímetro urbano de Cáceres, padrões semelhantes foram observados, com o ano de 2007 atingindo médias de 78,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o que representa um acréscimo de 152,3% em comparação a 2013 (31,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Em 2005 as concentrações médias atingiram 64,81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto em 2020 chegaram em médias de 70,51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 3).

Figura 3. Concentração anual de material particulado MP2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nos locais Pantanal, área municipal de Cáceres (AM Cáceres) e perímetro urbano de Cáceres (PU Cáceres) entre o período de 2000 a 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores.

DISCUSSÕES

O Pantanal e o município de Cáceres/MT evidenciam um processo contínuo e acentuado de aquecimento microclimático nas últimas duas décadas. Entre 2000 e 2024, a temperatura média do ar aumentou 9,4%, acompanhada por uma expressiva redução de 16,7% na umidade relativa. Essa combinação de calor acentuado e umidade baixa representa uma mudança significativa no balanço térmico e hídrico da região, indicando não apenas um reflexo das tendências observadas em escala de bioma (Lázaro e Oliveira-Junior et al., 2020), mas também uma intensificação local possivelmente associada à expansão urbana, à impermeabilização do solo, e a alteração do uso e cobertura da vegetação nativa (Ghobadi et al., 2018; Lee, 2024).

O aumento da temperatura média para valores superiores a 27 °C elevou os índices bioclimáticos a patamares críticos. O Índice de Calor (IC) ultrapassou os 30 °C nos anos de 2023 e 2024 em todas as áreas analisadas, o que caracteriza condições de risco para a saúde humana, especialmente em grupos mais vulneráveis, como idosos, crianças e trabalhadores expostos ao sol (Epstein et al., 2006; Figueiredo et al., 2024). Esses resultados indicam que a população de Cáceres e das áreas pantaneiras adjacentes já convive com níveis de desconforto térmico potencialmente perigosos, capazes de aumentar a incidência de estresse térmico e agravar doenças cardiovasculares e respiratórias (Oliveira et al., 2020; Réquia et al., 2024).

A essa realidade térmica soma-se o agravamento da qualidade do ar (Neto et al., 2024). As concentrações de material particulado fino (MP_{2,5}) atingiram valores alarmantes, especialmente nos anos secos de 2005, 2007 e, de forma mais severa, em 2020 — quando as médias anuais

ultrapassaram $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e os picos diários excederam $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esses valores superam em mais de quatro vezes os limites anuais recomendados pela Organização Mundial da Saúde ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ano}$) e estão diretamente relacionados à intensificação das queimadas no Pantanal (Libonati et al., 2021). O ano de 2020, em particular, representou a confluência extrema de estressores climáticos e poluentes, configurando uma “tempestade perfeita”: temperaturas recordes, IC acima de 30°C e níveis críticos de $\text{MP}_{2,5}$ ($> 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Essa coexposição potencializou os impactos à saúde pública, refletindo-se no aumento de hospitalizações por doenças respiratórias e cardiovasculares, conforme apontam estudos epidemiológicos recentes para a região (Caumo et al., 2022; Santos et al., 2025). HAVERÁ INSERÇÃO DE DADOS SOBRE HOSPITALIZAÇÕES?

A principal fonte dessas emissões está associada às práticas de uso e ocupação do solo, tanto no bioma quanto no município, a pecuária extensiva é a atividade predominante (Araujo et al., 2018) e, frequentemente, o fogo é utilizado para renovação de pastagens (Schulz et al., 2019). Quando descontroladas, essas queimadas liberam grandes volumes de poluentes atmosféricos que se dispersam para áreas urbanas, comprometendo ainda mais a qualidade do ar (Palácios et al., 2022; Souto-Oliveira et al., 2023). Nossos resultados indicam que mesmo as áreas menos urbanizadas, dentro da planície pantaneira apresentaram os maiores picos de $\text{MP}_{2,5}$, evidenciando que a degradação atmosférica transcende os limites rurais e urbanos, atingindo todo o sistema regional.

De forma integrada, o aumento da temperatura, a redução da umidade e a deterioração da qualidade do ar configuram um cenário de preocupação iminente para o Pantanal e Cáceres. Essa sinergia de estressores ambientais não apenas compromete o equilíbrio dos ecossistemas locais, mas também coloca em risco o bem-estar da população humana (García, 2023). Com o avanço das mudanças climáticas, projeta-se que os eventos de calor extremo e secas prolongadas se tornem mais frequentes e severos (Marengo et al., 2021), ampliando os impactos sobre os grupos mais vulneráveis social e economicamente.

A capacidade adaptativa da sociedade frente a dinâmica termo-poluidora é influenciada por diversos fatores socioeconômicos e contextuais. A adaptação a eventos de alta intensidade térmica e picos de poluição atmosférica é desigual entre diferentes grupos sociais, com populações de baixa renda e minorias étnicas geralmente mais expostas à esses estressores e com menor capacidade adaptativa (Zografos et al, 2016; Andrijevic et al., 2021; Slesinski et al., 2024). Tal realidade evidencia a discrepância entre as demandas impostas pela crise climática e as estratégias de adaptação atualmente implementadas, que se mostram insuficientes diante da magnitude e da velocidade do fenômeno.

Assim, a região se encontra diante de uma nova realidade microclimática – um ciclo de aquecimento acelerado, baixa umidade e poluição atmosférica recorrente que reforça a

vulnerabilidade socioambiental do bioma e de seus habitantes. Diante desse contexto, torna-se urgente o desenvolvimento de estratégias integradas de manejo, mitigação e adaptação, voltadas à preservação da resiliência ecológica e à proteção da saúde pública (Vachiano et al., 2021; García, 2023).

CONCLUSÕES

Este estudo evidencia que o Pantanal se encontra em transição para um novo e mais perigoso regime ambiental, caracterizado pela intensificação simultânea do estresse térmico e de episódios críticos de poluição atmosférica. A análise de 24 anos de dados microclimáticos demonstra uma tendência inequívoca de aquecimento e aridificação, condições que favorecem a ocorrência de incêndios mais frequentes e intensos. Esses eventos, por sua vez, amplificam os níveis de material particulado fino (MP_{2,5}), configurando um ciclo de retroalimentação que ameaça tanto a integridade ecológica do bioma quanto a saúde das populações humanas.

As políticas públicas atuais, predominantemente reativas e voltadas à resposta a crises, como grandes incêndios ou períodos de seca extrema, mostram-se insuficientes diante da natureza crônica e progressiva da degradação ambiental observada. Os resultados de longo prazo aqui apresentados comprovam que os eventos extremos (picos de temperaturas e poluentes atmosféricos) não são exceções, mas consequências previsíveis de um processo contínuo de transformação climática e uso inadequado do solo. Persistir em uma abordagem emergencial é perpetuar o ciclo de destruição ambiental e vulnerabilidade social.

Assim, a atenção ao Pantanal não pode se restringir a períodos de calamidade, mas deve constituir uma política contínua de monitoramento, manejo e adaptação baseada em evidências científicas. A divulgação de registros microclimáticos, como os apresentados neste estudo, é essencial para dar visibilidade ao processo de degradação em curso e subsidiar ações concretas de mitigação. Proteger o Pantanal transcende a conservação de sua biodiversidade ou a defesa das populações humanas que dele dependem — trata-se de garantir a manutenção de um sistema ecológico funcional e habitável em um futuro próximo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHO, C. J. R. Biodiversity of the Pantanal: response to seasonal flooding regime and to environmental degradation. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 4, supl., p. 957-966, 2008. DOI:(<https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000500005>).
- ANDRIJEVIC, M. *et al.* Future cooling gap in shared socioeconomic pathways. **Environmental Research Letters**, v. 16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2195>.
- ANTONIOU, N. *et al.* On the impact of climate change on urban microclimate, thermal comfort, and human health: Multiscale numerical simulations. **Building and Environment**, v. 260, p. 111690, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111690>.

ARAUJO, A. *et al.* Beef Cattle Production Systems in South Pantanal: Considerations on Territories and Integration Scales. **Land**, v. 7, n. 4, p. 156, 2018. DOI:<https://doi.org/10.3390/LAND7040156>.

ARTAXO, P. *et al.* Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. **Acta Amazonica**, v. 35, p. 185-196, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0044-59672005000200008>.

BARBOSA, M. L. F. *et al.* Compound impact of land use and extreme climate on the 2020 fire record of the Brazilian Pantanal. **Global Ecology and Biogeography**, v. 31, n. 10, p. 1960-1975, 2022. <https://doi.org/10.1111/geb.13563>

CAUMO, S. *et al.* Human risk assessment of ash soil after 2020 wildfires in Pantanal biome (Brazil). **Air Quality, Atmosphere, & Health**, v. 15, p. 2239-2254, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01248-2>.

CHRISTOPHER, S.; GUPTA, P. Global Distribution of Column Satellite Aerosol Optical Depth to Surface PM_{2.5} Relationships. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1985, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12121985>.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **ERA5-Land Hourly Data from 2001 to Present.**, [s.d.]. Disponível em: <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>. Acesso em: 1 mar. 2022.

DA SILVA, E. A. *et al.* ANÁLISE TEMPORAL DA OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NAS AMÉRICAS E REGIÃO DO CARIBE. **Nativa**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i5.5845>.

EPSTEIN, Y.; MORAN, D. S. Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. **Industrial Health**, v. 44, n. 3, p. 388-398, 2006. DOI: <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>.

FIGUEIREDO, W. V. R. *et al.* Índice de Calor (IC), Índice de Desconforto Térmico (IDT) e Índice de Temperatura e Umidade (ITU) na Cidade de Diamantino, Mato Grosso, para o Período de 2018 a 2021. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 28, n. 4, p. 445-450, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2024v28n4p445-450>.

GALVANIN, E. *et al.* Mixed-effects modeling for analyzing land use change in the Brazilian Pantanal subregion of Cáceres. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.008>.

GARCÍA, M. S. **Urgent alert on human rights threats due to Pantanal degradation.** Aida Americas, 2025. Disponível em: <https://aida-americas.org/en/blog/urgent-alert-human-rights-threats-due-pantanal-degradation>. Acesso em: 4 set. 2025.

GHOBADI, A.; KHOSRAVI, M.; TAVOUSHI, T. Surveying of heat waves impact on the urban heat islands: Case study, the Karaj City in Iran. **Urban Climate**, v. 24, p. 600-615, 2018.

GUERRA, A. *et al.* Drivers and projections of vegetation loss in the Pantanal and surrounding ecosystems. **Land Use Policy**, v. 91, p. 104388, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104388>.

HANSEN, M. C. *et al.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. **Science**, v. 342, n. 6160, p. 850-853, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JUNK, W. J. *et al.* Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 24, p. 5-22, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>.

KRÜGER, E. L. *et al.* Short- and long-term acclimatization in outdoor spaces: Exposure time, seasonal and heatwave adaptation effects. **Building and Environment**, v. 116, p. 17–29, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.001>.

LEE, J. Assessment of US urban surface temperature using GOES-16 and GOES-17 data: urban heat island and temperature inequality. **Weather, Climate, and Society**, v. 16, n. 2, p. 315-329, 2024. DOI: (<https://doi.org/10.1175/WCAS-D-23-0129.1>).

LIBONATI, R. *et al.* Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. **Environmental Research Letters**, v. 17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>.

LOUZADA, R. *et al.* Avulsions drive ecosystem services and economic changes in the Brazilian Pantanal wetlands. **Current Research in Environmental Sustainability**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100057>.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; TORRES, R. R. Regional climate change scenarios in the Brazilian Pantanal watershed. **Climate Research**, v. 68, p. 201-213, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01324>.

MARENGO, J. A. *et al.* Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**, v. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>.

MARQUES, J. S. *et al.* Fires dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. **Journal of Environmental Management**, v. 299, p. 113586, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113586>.

MARQUES, M. M.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of the landscape changes in the low streamflows of Pantanal headwaters—Brazil. **Hydrological Processes**, v. 36, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.14617>.

MUÑOZ-SABATER, J. *et al.* ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. **Earth System Science Data**, v. 13, p. 4349–4383, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

NETO, J. A. P. *et al.* Bioclimatic Zoning of the Pantanal. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v61i1.97357>.

OLIVEIRA, B. S. S. *et al.* Impacts of heat stress conditions on mortality from respiratory and cardiovascular diseases in Brazil. **Sustentabilidade em Debate**, v. 11, n. 3, p. 297-330, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18472/sustdeb.v11n3.2020.33970>.

PALÁCIOS, R. S. *et al.* Optical properties and spectral dependence of aerosol light absorption over the Brazilian Pantanal. **Atmospheric Pollution Research**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101413>.

RÉQUIA, W. J. *et al.* Thermal stress and hospital admissions for cardiorespiratory disease in Brazil. **Environment International**, v. 187, p. 108694, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108694>.

ROSSETTO, O. C.; GIRARDI, E. P. DINÂMICA AGRÁRIA E SUSTENTABILIDADE SOCIOAMBIENTAL NO PANTANAL BRASILEIRO. **Revista Nera**, n. 21, p. 135-161, 2013. Disponível em: <http://observatoriodageografia.uepg.br/files/original/d8a1df2bda1e967ea4270bc657bee1d7483594e7.pdf>. Acesso em: 19 out. 2025.

SANTOS, J. S. **Campo térmico urbano e a sua relação com o uso e cobertura do solo em uma cidade tropical úmida**. 2011. 110 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1849>. Acesso em: 19 out. 2025.

SANTOS, M. C. dos *et al.* Análise da qualidade do ar em 15 municípios de Mato Grosso: impactos potenciais na saúde humana. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 36, n. 21, p. 728-749, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v36i21.18693>.

SCHULZ, C. *et al.* Physical, ecological and human dimensions of environmental change in Brazil's Pantanal wetland: Synthesis and research agenda. **The Science of the Total Environment**, v. 687, p. 1011-1027, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.023>.

SILVA, J. S. V. da; ABDON, M. de M. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p. 1703-1711, 1998.

SILVA, V. P. R. da *et al.* Characteristics of extreme meteorological droughts over the Brazilian Pantanal throughout the 21st century. **Frontiers in Water**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1385077>.

SLESINSKI, S. *et al.* Thermal inequality and heat-related adaptive capacity: A systematic review. **The European Journal of Public Health**, v. 34, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae144.904>.

SOBREIRA, E. O. J. *et al.* Wildfires and their toll on Brazil: Who's counting the cost? **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 23, n. 3, p. 214–217, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2025.06.003>.

SOUTO-OLIVEIRA, C. E. *et al.* Impact of extreme wildfires from the Brazilian Forests and sugarcane burning on the air quality of the biggest megacity on South America. **The Science of the Total Environment**, p. 163439, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163439>.

STEADMAN, R. G. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, p. 861-873, 1979. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2).

THIELEN, D. *et al.* Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. **PLoS ONE**, v. 15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227437>.

THOM, E. C. The Discomfort Index. **Weatherwise**, v. 12, n. 2, p. 57-61, 1959. DOI: <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>.

TOMAS, W. M. *et al.* Sustainability Agenda for the Pantanal Wetland: Perspectives on a Collaborative Interface for Science, Policy, and Decision-Making. **Tropical Conservation Science**, v. 12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/1940082919872634>.

TOMAS, W. M. *et al.* Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, p. 23547, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02844-5>.

VACHIANO, M.; NUNES, J. da S.; SILVA, C. da. Strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT matrix) of traditional communities under the perspective of ecological and sociocultural resilience in the Pantanal biosphere reserve, Mato Grosso, Brazil. **Aracê**, v. 6, n. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev6n4-446>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. Acesso em: jan. 2024.

WU, Y. *et al.* Wildfire-related PM_{2.5} and health economic loss of mortality in Brazil. **Environment International**, v. 174, p. 107906, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107906>.

YAN, Y.; XU, Y.; YUE, S. Um conjunto de dados de alta resolução espacial de índices de estresse térmico humano no sul e leste da Ásia. **Scientific Data**, v. 8, p. 229, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01010-w>.

ZOGRAFOS, C.; ANGUELOVSKI, I.; GRIGOROVA, M. When exposure to climate change is not enough: Exploring heatwave adaptive capacity of a multi-ethnic, low-income urban community in Australia. **Urban Climate**, v. 17, p. 248-265, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.06.003>.

CAPÍTULO 2

ARTIGO ACEITO: Revista Brasileira de Climatologia

Observações climáticas: registro de onda de calor em municípios da região centro-oeste do Brasil

Climatic observations: heatwave records in municipalities of the central-west region of Brazil

Cleverson Ricardo Soares Viana

Wilkinson Lopes Lázaro

Josiane Santos Batista Carioca de Paula

Ernandes Sobreira Oliveira Junior

RESUMO

O aumento significativo da temperatura média global é amplamente atribuído à elevação das concentrações de gases de efeito estufa, impulsionada por atividades antrópicas. Esse processo tem resultado em maior frequência e intensidade de ondas de calor, agravando a crise climática e impactando negativamente a saúde e o bem-estar das populações. Neste estudo, buscou-se identificar e analisar as ondas de calor ocorridas em dois municípios do estado de Mato Grosso — Porto Estrela e Cuiabá — entre os anos de 2008 e 2023, com base em dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os resultados indicaram que Cuiabá apresentou a maior ocorrência, com 52 eventos, enquanto Porto Estrela registrou 34. Ao longo dos 15 anos, observou-se em Cuiabá um aumento de aproximadamente 600% no número de eventos. Identificou-se ainda que o pico térmico ocorre entre o quarto e o sexto dia das ondas de calor, atingindo a temperatura máxima de 41,2 °C. Esses achados evidenciam que as ondas de calor no estado de Mato Grosso tendem a se tornar mais severas e duradouras, reforçando a necessidade de estratégias de mitigação e adaptação térmica em ambientes urbanos, como uma responsabilidade compartilhada entre governo, setor privado e sociedade civil.

Palavras-chave: Eventos climáticos extremos; ilha de calor urbana; aclimação.

ABSTRACT

The significant increase in global mean temperature is largely attributed to rising concentrations of greenhouse gases driven by anthropogenic activities. This process has resulted in a higher frequency and intensity of heatwaves, exacerbating the climate crisis and negatively affecting public health and human well-being. In this study, we sought to identify and analyze heatwave events occurring in two municipalities in the state of Mato Grosso — Porto Estrela and Cuiabá —

between 2008 and 2023, based on data from the National Institute of Meteorology (INMET). The results indicated that Cuiabá recorded the highest number of events, with 52 heatwaves, while Porto Estrela registered 34. Over the 15-year period, Cuiabá exhibited an approximate 600% increase in the number of events. We also identified that the thermal peak occurs between the fourth and sixth day of each heatwave, reaching a maximum temperature of 41.2 °C. These findings demonstrate that heatwaves in the state of Mato Grosso are becoming more severe and longer-lasting, reinforcing the need for mitigation and thermal adaptation strategies in urban environments as a shared responsibility among government, the private sector, and civil society.

Keywords: Extreme climate events; urban heat island; acclimatization.

INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos estão se tornando cada vez mais frequentes e intensos em todo o mundo como consequência do aquecimento global (Seneviratne et al., 2021; IPCC, 2023). Notavelmente, as temperaturas de verão têm superado repetidamente os recordes históricos nos últimos anos (Clarke et al., 2022; Perkins-Kirkpatrick et al., 2022). Esse aumento é principalmente impulsionado pela elevação significativa nas concentrações de gases de efeito estufa resultantes de atividades antropogênicas (Malik e Lenzen, 2016). O aumento das temperaturas é particularmente preocupante devido aos seus impactos significativos na saúde humana, segurança alimentar e desenvolvimento econômico (Vicedo-Cabrera et al., 2021; Hu et al., 2024).

Ondas de calor são eventos climáticos extremos caracterizados por períodos prolongados, tipicamente de cinco dias ou mais, com temperaturas 5 °C acima da média (IPCC, 2021). Esses eventos consistem em temperaturas persistentemente altas, superando as médias máximas de longo prazo de uma determinada localidade, durando vários dias ou até semanas (SANTOS et al., 2024). No Brasil, as ondas de calor seguiram a tendência global, ocorrendo com maior frequência e intensidade (Geirinhas et al., 2018; Umezaki et al., 2020; Da Silva et al., 2023).

A região Centro-Oeste do Brasil, uma área tropical, é esperada para ser uma das mais afetadas pelas mudanças climáticas. Nessa região, as intensas ondas de calor tornaram-se mais frequentes, aumentando o risco de incêndios florestais em florestas, campos e lavouras, ameaçando assim a biodiversidade e a produção de alimentos (Raza et al., 2024; Silveira et al., 2019; Lázaro e Oliveira-Junior, 2020; IPCC, 2023). Os eventos climáticos extremos têm gerado graves preocupações na saúde pública devido ao aumento do risco de doenças relacionadas ao calor, na economia devido às perdas na produção agrícola e pecuária, e no meio ambiente devido ao aumento de focos de incêndios florestais (Junges et al., 2022).

Nas áreas urbanas, os impactos das ondas de calor variam dependendo de como a radiação solar é processada pela superfície observada. Por exemplo, as áreas verdes permanecem mais frescas do que as áreas construídas, enquanto as superfícies asfaltadas são significativamente mais

quentes do que o solo nu (Moisa, 2022). Em áreas urbanas, a substituição da vegetação por superfícies impermeáveis, como o asfalto, exacerba o aquecimento, aumentando as temperaturas em até 1,5 °C em comparação com as áreas rurais (Ghobadi et al., 2018; Amorim, 2019; Ferreira et al., 2020).

As cidades localizadas em regiões tropicais, como as do estado de Mato Grosso, Brasil, estão relativamente mais expostas a ondas de calor intensas e frequentes. Essa vulnerabilidade pode ser atribuída a uma combinação de fatores geográficos, climáticos e socioeconômicos prevalentes nessas regiões. As características intrínsecas das altas temperaturas anuais e elevada umidade nos climas tropicais amplificam a intensidade das ondas de calor, representando ameaças significativas à saúde pública e à biodiversidade (Marengo et al., 2017). Em cidades tropicais, a urbanização rápida, comum na maioria das cidades brasileiras intensifica ainda mais as ilhas de calor urbanas, agravando o problema (Santos et al., 2016).

Mato Grosso, localizado na interseção dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, possui características ecológicas únicas e é particularmente sensível às mudanças climáticas (Nobre et al., 2017). O desmatamento e a conversão de terras para agricultura e pecuária agravam ainda mais os impactos das ilhas de calor urbanas, removendo a vegetação natural, que regula a absorção de calor, proporciona sombra e facilita a evapotranspiração que auxilia no resfriamento local (De Lima et al., 2018). Essas atividades antropogênicas, combinadas com a localização geográfica do estado, criam vulnerabilidades nas cidades de Mato Grosso, exigindo estratégias específicas de mitigação e adaptação para proteger a saúde pública e os ecossistemas locais.

Este estudo tem como objetivo identificar as ondas de calor em dois municípios brasileiros localizados na confluência dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, caracterizados por perfis demográficos e urbanos distintos (Porto Estrela e Cuiabá). O estudo busca contribuir para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas em uma região que tem vivenciado estresse climático evidente, especialmente nos últimos anos. Alinha-se ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13, especificamente à meta 13.1, que visa aumentar a capacidade de adaptação aos riscos climáticos, impactos e desastres naturais.

METODOLOGIA

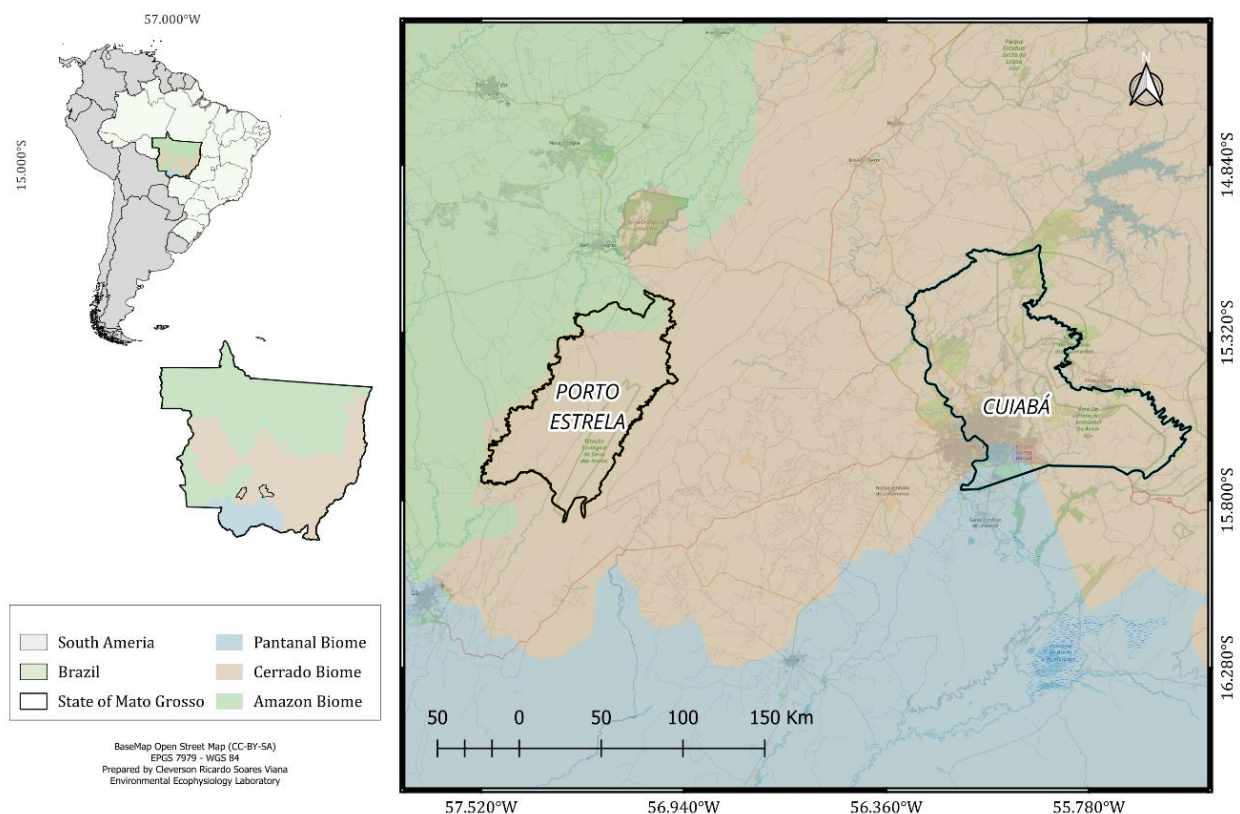
Área de estudo

O município de Cuiabá, capital e maior centro urbano do estado de Mato Grosso, possui uma população de 650.887 habitantes e uma área territorial de 4.327,448 km² (IBGE, 2022). Localizada na região Centro-Oeste do Brasil, com coordenadas aproximadas de 15°35'S e 56°06'O e altitude média de 165 metros, Cuiabá desempenha papel estratégico nas esferas política, de saúde e cultural do estado, configurando-se como o principal polo urbano e administrativo da região (IBGE, 2022; Figura 1). O município de Porto Estrela, por sua vez, apresenta 2.045,467

km² de extensão territorial e uma população de 3.224 habitantes (IBGE, 2022). Localizado a cerca de 190 km a oeste de Cuiabá, nas proximidades do rio Paraguai, o município situa-se em uma região de transição ecológica única, abrangendo três importantes biomas brasileiros — Pantanal, Amazônia e Cerrado —, o que lhe confere alta relevância ecológica e ambiental.

Cuiabá e Porto Estrela estão inseridas em uma região de clima tropical sazonal do tipo Aw, conforme a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos secos e igualmente quentes. Em Cuiabá, a intensa urbanização, a redução da cobertura vegetal e o adensamento construtivo intensificam o fenômeno das ilhas de calor urbanas, elevando as temperaturas e ampliando a frequência de eventos térmicos extremos. Em contraste, Porto Estrela, influenciada pelas planícies alagáveis do Pantanal e pela preservação de extensas áreas naturais, apresenta condições microclimáticas mais amenas e maior umidade relativa, constituindo um importante contraponto climático à capital. Essa diferenciação torna o par Cuiabá–Porto Estrela especialmente relevante para análises comparativas sobre a influência do uso e ocupação do solo, da cobertura vegetal e da urbanização na intensificação das ondas de calor na região Centro-Oeste do Brasil.

Figura 1. Apresentação da localização dos municípios no Estado de Mato Grosso, abrangendo sua extensão territorial e presença nos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Registros térmicos entre 2008 e 2023

Os dados de temperatura referentes aos municípios de Cuiabá e Porto Estrela foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por meio de sua plataforma online de dados históricos (<https://portal.inmet.gov.br/servicos/bdmep-dados-hist%C3%B3ricos>), em 15 de março de 2024. Para a análise temporal, foi selecionado o período de 2008 a 2023, contemplando todas as séries disponíveis para ambos os municípios.

As medições são provenientes de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET, que realizam registros contínuos e padronizados de temperatura do ar em intervalos horários, utilizando sensores termométricos instalados em abrigos meteorológicos padronizados a 1,5 metro de altura do solo, conforme as normas da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Essas estações integram a Rede de Observações Meteorológicas de Superfície (RMS) e seguem protocolos automáticos de aquisição, armazenamento e transmissão de dados, garantindo alta precisão e comparabilidade temporal entre os registros.

Identificação do período de onda de calor

Identificação dos eventos de onda de calor foi realizada com base na metodologia proposta pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2015), adotada também em relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Inicialmente, foram determinados os limites de temperatura máxima diária a partir da média móvel anual calculada para cada município. Em seguida, foram identificados os dias em que a temperatura máxima diária ultrapassou o limite climatológico de altas temperaturas definidas para o período de referência.

De acordo com a metodologia da OMM, um evento é caracterizado como onda de calor quando ocorrem cinco ou mais dias consecutivos em que a temperatura máxima diária excede o percentil 90 (P90) da climatologia local ou a média das temperaturas máximas anuais de referência. Esse critério permite diferenciar anomalias térmicas isoladas de eventos extremos persistentes, assegurando a comparabilidade dos resultados com estudos internacionais sobre extremos climáticos.

Tratamento de dados

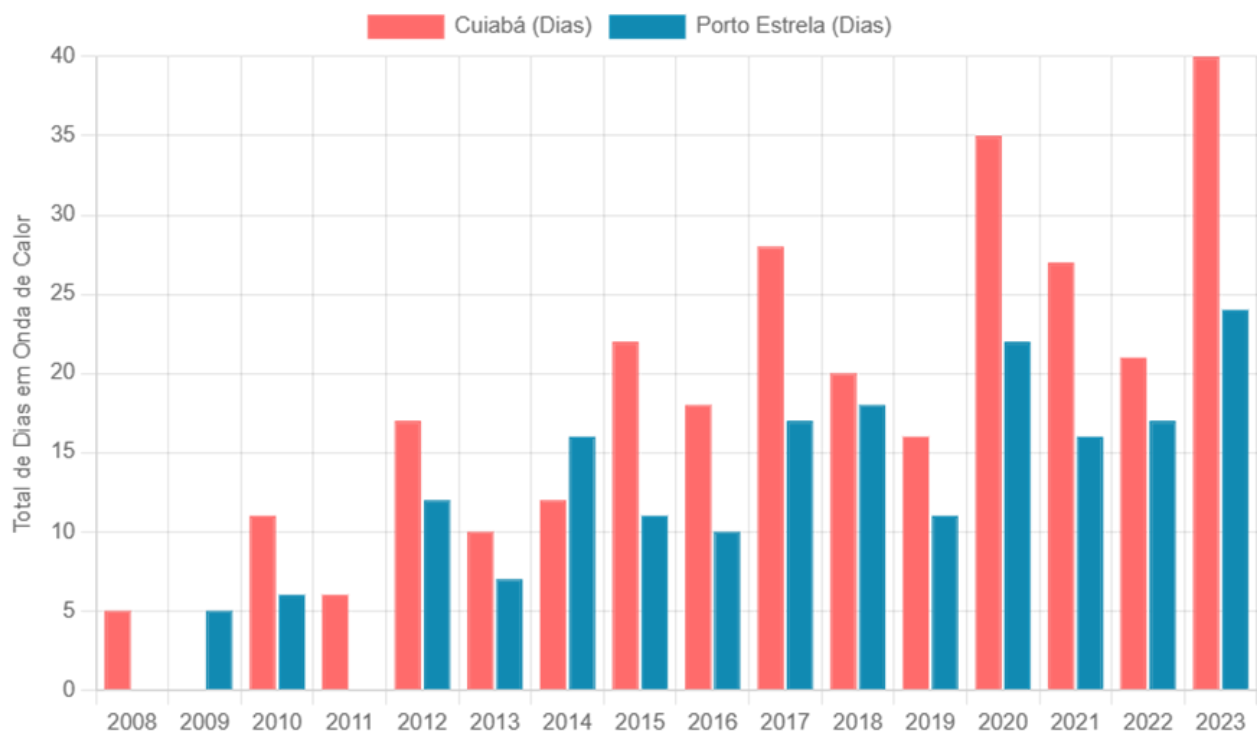
Os dados coletados foram inicialmente importados para planilhas do Excel®, onde passaram por um rigoroso processo de limpeza e padronização, com a remoção de valores ausentes, duplicados e inconsistentes, assegurando a qualidade e confiabilidade das informações. Em seguida, os dados foram carregados no ambiente Python®, utilizando a biblioteca Pandas para calcular o Percentil 90 (P90) da distribuição das temperaturas máximas diárias.

RESULTADOS

Duração total anual das ondas de calor

A análise das ondas de calor registradas em Cuiabá e Porto Estrela entre 2008 e 2023 evidencia uma tendência clara de intensificação e aumento da duração desses eventos extremos. Em ambas as localidades, observa-se um crescimento expressivo no número de dias sob condição de onda de calor ao longo da série temporal (Figura 2). Em Cuiabá, o total anual passou de 5 dias em 2008 para um pico alarmante de 40 dias em 2023, representando um aumento de 600% no período analisado. Já em Porto Estrela, embora os valores absolutos sejam menores, a tendência ascendente é igualmente evidente, alcançando 24 dias em 2023. Os anos de 2020 e 2023 se destacam como os mais severos, com 35 e 40 dias em Cuiabá e 22 e 24 dias em Porto Estrela, respectivamente. Esses resultados reforçam o padrão de maior vulnerabilidade térmica de Cuiabá, que apresenta sistematicamente maior frequência e duração de ondas de calor em comparação à área de Porto Estrela.

Figura 2. Detalhamento da duração total anual, demonstra um aumento no número total de dias que cada cidade passou sob condições de onda de calor.

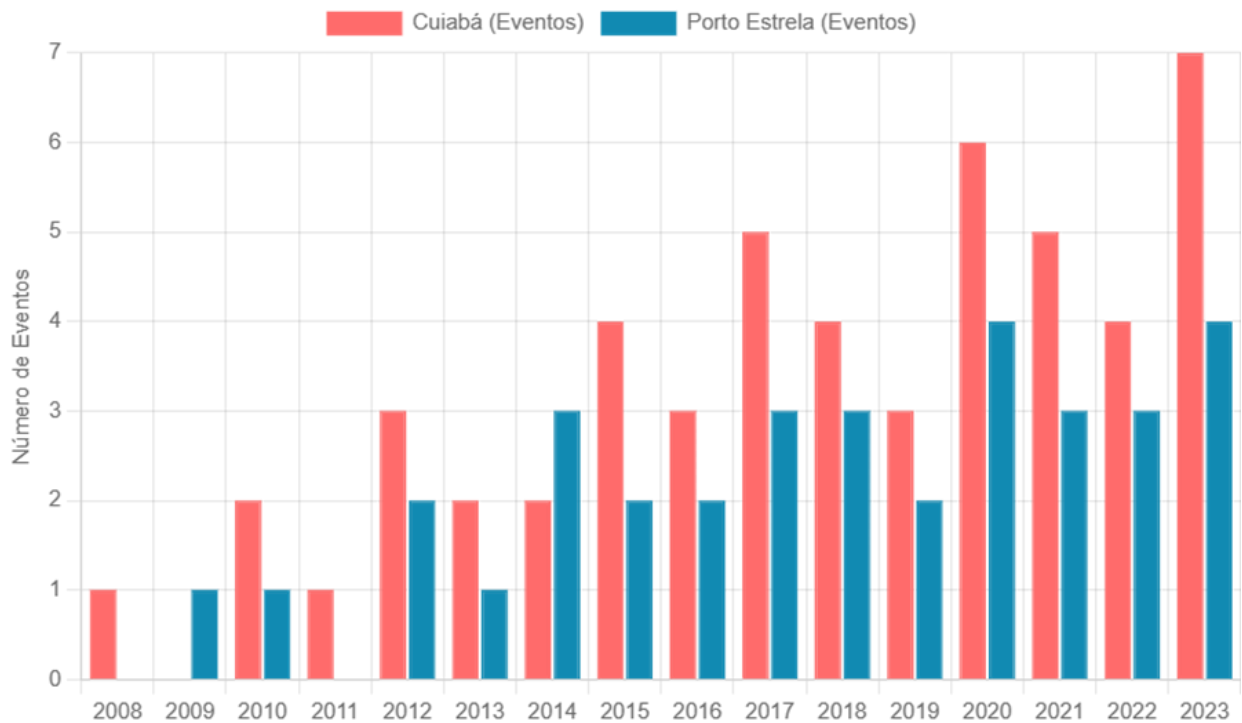


Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise da frequência anual de ondas de calor revela que esses eventos não apenas se tornaram mais longos, mas também mais recorrentes. Observa-se uma tendência consistente de aumento no número de episódios distintos por ano em ambas as localidades. Em Cuiabá, o número de eventos passou de apenas um em 2008 para um pico de sete em 2023, indicando um crescimento significativo na frequência de ocorrência. Os anos de 2020 e 2023 se destacam como os períodos de maior recorrência, com Cuiabá registrando seis e sete eventos, respectivamente, enquanto Porto

Estrela apresentou quatro eventos em ambos os anos (Figura 3). Esse padrão contrasta fortemente com o início da série histórica, quando nenhuma ou apenas uma onda de calor era observada anualmente, evidenciando uma mudança clara na dinâmica térmica regional e o aumento da persistência de condições extremas de calor.

Figura 3. Demonstração do número de eventos extremos ao longo dos anos.

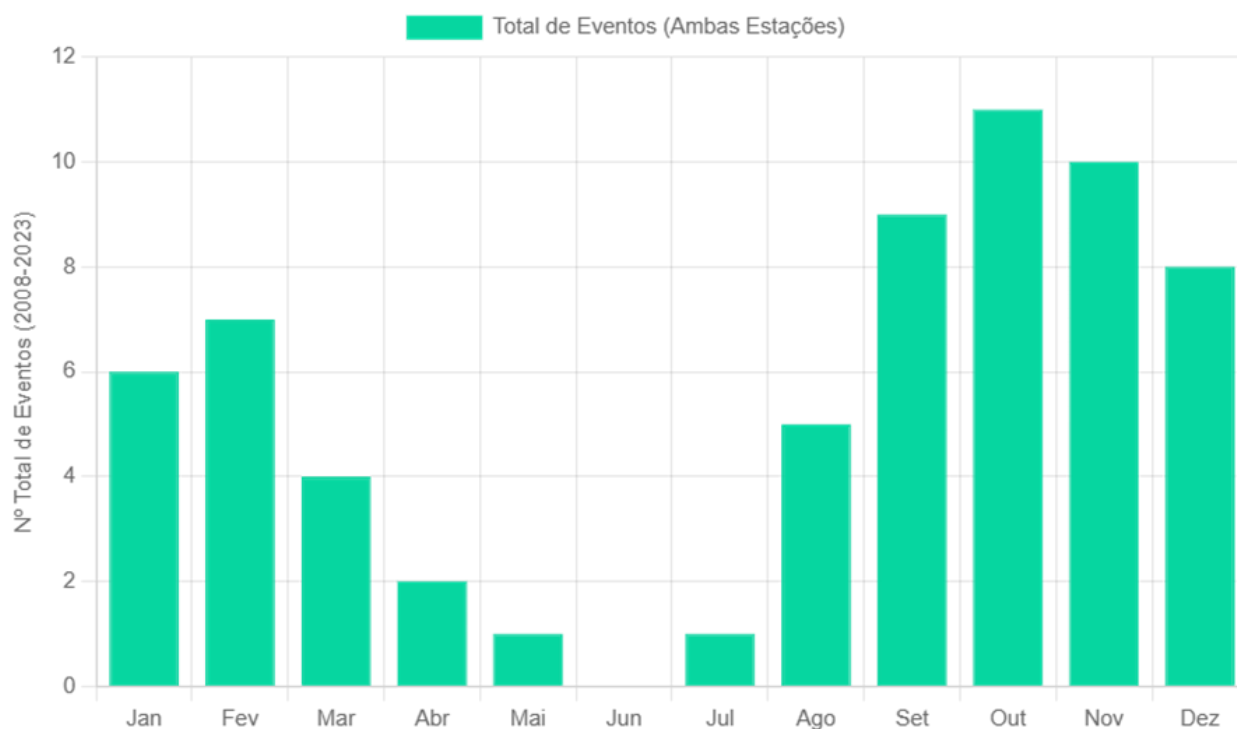


Fonte: Elaborado pelos autores.

Sazonalidade

A análise do padrão sazonal revela uma distribuição bem definida das ondas de calor, com acentuada concentração de eventos durante a primavera do Hemisfério Sul. O mês de outubro apresenta a maior incidência, totalizando 11 eventos, seguido de novembro (10) e setembro (9). Em conjunto, esses três meses correspondem a aproximadamente 47% de todas as ocorrências registradas ao longo dos 16 anos, evidenciando a primavera como o principal período de risco térmico. Em contraste marcante, o inverno configura-se como a estação de menor vulnerabilidade, com junho sem nenhum registro e maio e julho apresentando apenas um evento cada. Observa-se ainda um segundo pico de ocorrência no verão, embora menos pronunciado, destacando-se dezembro (8 eventos) e fevereiro (7 eventos), o que indica a persistência de condições favoráveis à ocorrência de extremos térmicos também no início do período chuvoso (Figura 4).

Figura 4. Sazonalidade, agregando o total de eventos por mês de ambas as estações.

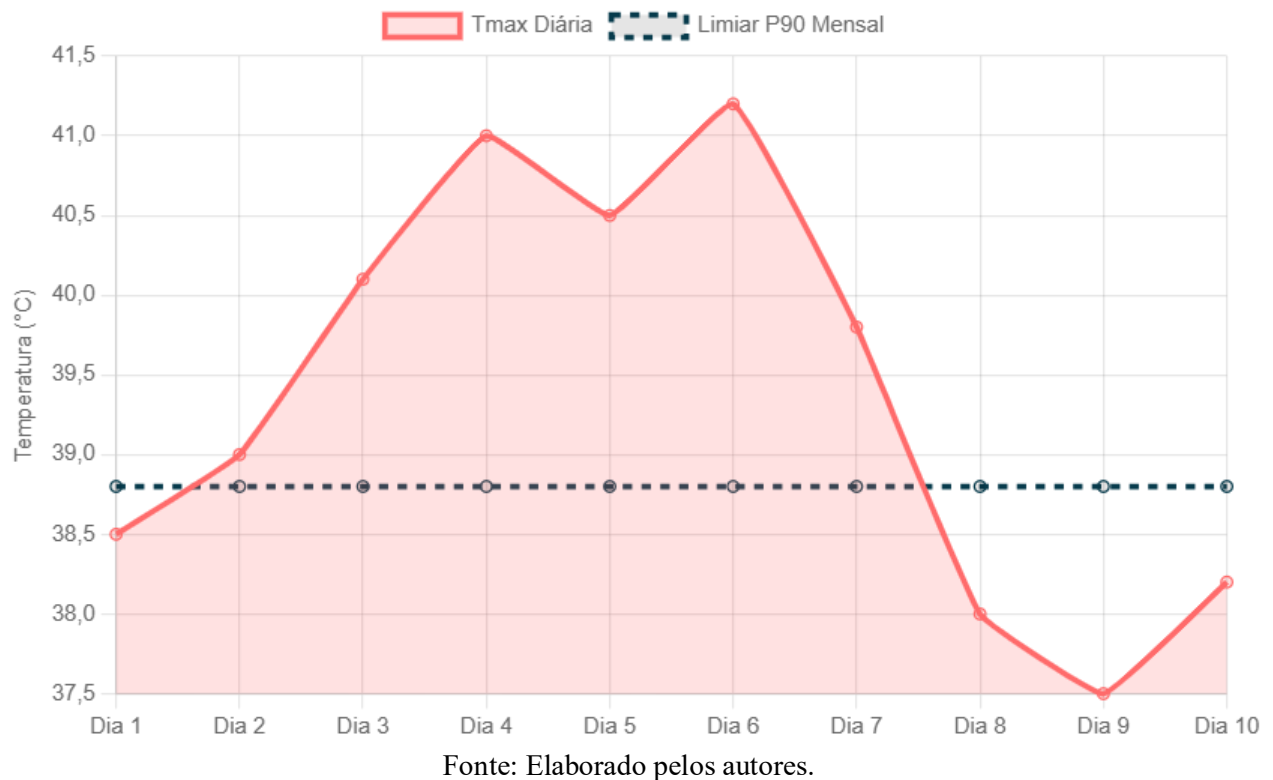


Fonte: Elaborado pelos autores.

Anatomia de uma onda de calor na região estudada

Os resultados indicam que, ao longo dos anos, as ondas de calor apresentam um comportamento consistente de intensificação até o quarto dia de duração. Entre o primeiro e o quarto dia, a temperatura média aumenta de 38,5°C para 41°C, o que representa um incremento de aproximadamente 6,5% — evidenciando um rápido acúmulo de calor no início do evento. O pico térmico absoluto ocorre no sexto dia, quando a temperatura atinge 41,2°C, consolidando o ápice da onda. A partir do sétimo dia, observa-se uma queda abrupta de cerca de 7,8%, reduzindo a média para 38°C, o que marca o fim do evento extremo e a dissipação do calor acumulado (Figura 5).

Figura 5. Crescente térmica ao longo de uma onda de calor nos locais analisados.



DISCUSSÕES

Os resultados demonstram que as ondas de calor estão ocorrendo com maior frequência ao longo dos anos, evidenciando um aumento expressivo de aproximadamente 600% nesse evento climático extremo. Esse crescimento reflete um padrão consistente de intensificação térmica regional, alinhado às tendências globais descritas no Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021). De acordo com o relatório, o aumento na ocorrência e duração das ondas de calor está diretamente relacionado às emissões antrópicas de gases de efeito estufa, reforçando a necessidade urgente de estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas em curso (IPCC, 2021). Estudos regionais, como os de Libonati et al. (2022), apontam os efeitos específicos das ondas de calor em ecossistemas sensíveis, como o Pantanal no Brasil, onde as consequências ecológicas e socioeconômicas desses eventos extremos são particularmente pronunciadas, exigindo atenção especial para o desenvolvimento de estratégias de resiliência e adaptação.

O cenário mais otimista do IPCC, representado pelo RCP 2.6, projeta aumentos significativos na temperatura média global até o final do século, com impactos severos nos serviços ecossistêmicos e econômicos, particularmente nas regiões que são fontes de commodities, como o Centro-Oeste do Brasil (Nazareth et al., 2018; Marsden et al., 2018). Esse cenário indica um possível colapso ecológico, onde os ecossistemas podem sucumbir às altas temperaturas. Mudanças climáticas como essas, se não mitigadas, podem prejudicar serviços essenciais como

regulação da água, fornecimento de alimentos e biodiversidade (Mooney et al., 2007; Hanjra et al., 2010). Além disso, o impacto ambiental pode se tornar irreversível, agravando a perda de habitat e colocando em risco a sustentabilidade das atividades econômicas dependentes dos recursos naturais.

Os efeitos dessas mudanças climáticas extremas também impactam diretamente a saúde e o bem-estar das populações residentes nessas regiões. Estudos, como os relatados por Klinenberg et al. (2015), indicam que as ondas de calor já estão causando impactos significativos na saúde pública, incluindo aumento da ansiedade, estresse térmico e até complicações cardiovasculares, particularmente durante eventos prolongados. Leichenko et al. (2010) destacam ainda que as populações mais vulneráveis, frequentemente com menor capacidade financeira, enfrentam desafios adicionais na adaptação a essas condições extremas, resultando em maior exposição aos riscos. Associar essas projeções climáticas aos impactos na saúde permite entender que a população está cada vez mais suscetível a eventos climáticos extremos.

A urbanização descontrolada, combinada ao aumento das ondas de calor, intensificou os desafios enfrentados pelas populações expostas às altas temperaturas, especialmente aquelas envolvidas em atividades laborais durante períodos de maior radiação solar (Kjellstrom et al., 2009). Nos centros urbanos, fenômenos como as ilhas de calor urbanas exacerbam o desconforto térmico, tornando essas áreas propensas a períodos de calor extremo que impactam diretamente a qualidade de vida da população (Matsumoto et al., 2019). Estratégias adaptativas, como alteração do horário de trabalho para períodos mais frescos, são alternativas para mitigar os impactos das altas temperaturas no ambiente de trabalho (Kjellstrom et al., 2009). No contexto da região Centro-Oeste do Brasil, onde as projeções climáticas indicam o agravamento das ondas de calor, a implementação de estratégias semelhantes já parece necessária. Essas ações não só contribuirão para o bem-estar da população, mas também servirão como parte de uma abordagem integrada para adaptação às mudanças climáticas, promovendo resiliência social e econômica diante dos desafios futuros.

As ondas de calor podem ser prontamente minimizadas, pois impactam diretamente a dinâmica ambiental, transformando paisagens. Árvores e arbustos tornam-se menos eficazes nos processos de frutificação e polinização (Zhao et al., 2021), enquanto a fauna, como aves, mamíferos e anfíbios, está passando por estresse biológico inimaginável devido à intensidade das ondas de calor (Stillman, 2019; Conradie et al., 2020). Para mitigar as altas temperaturas durante as ondas de calor, alternativas como a criação de espaços verdes urbanos e corredores são eficazes. Essas áreas proporcionam sombreamento, resfriando calçadas e ruas, reduzindo as temperaturas locais (Yu et al., 2017). Além disso, é necessário um número de 1.449 árvores por habitante para manter um ecossistema minimamente habitável (Crowther et al., 2015; Our World In Data, 2024).

Nossos resultados apontam preocupações relevantes para os próximos anos, especialmente no que se refere à duração das ondas de calor. A análise da anatomia desses eventos na região revelou que o pico térmico ocorre entre o terceiro e o sexto dia de sua ocorrência, indicando uma persistência prolongada de condições extremas. Essa manutenção de temperaturas elevadas pode desencadear uma série de impactos adversos, como o agravamento e a intensificação das próprias ondas de calor, a ampliação de outros eventos climáticos extremos e o aumento do estresse térmico em áreas urbanizadas, fatores que afetam severamente tanto a saúde humana quanto os sistemas ambientais (Pandey et al., 2023).

As ondas de calor intensificam desafios importantes nas superfícies urbanas — especialmente no asfalto que, ao receberem forte radiação solar, elevam ainda mais as temperaturas locais (Kleerekoper et al., 2012). A exposição prolongada a esses extremos térmicos representa um risco significativo à saúde humana, pois o organismo não está fisiologicamente preparado para lidar com variações abruptas de temperatura (Kiarsi et al., 2023). Evidências mostram que um aumento de apenas 1°C pode levar a um incremento de até 3,5% na mortalidade diária durante episódios de onda de calor, ampliando substancialmente o risco populacional (Sharma et al., 2019; Tewari et al., 2023).

Assim, o aumento da frequência desse evento climático extremo pode gerar impactos negativos nos sistemas agrícolas, incluindo maior perda de água no solo e níveis de aquecimento que ultrapassam a capacidade de resistência das plantas. No meio urbano, esse aquecimento intensificado também aumenta a demanda energética para o resfriamento dos ambientes onde as pessoas vivem e trabalham. Em paralelo às ondas de calor, observa-se que a temperatura média anual tende a apresentar picos mais intensos, ampliando os riscos tanto para a saúde humana quanto para o equilíbrio ambiental. Esses fatores ressaltam a necessidade de implementar estratégias de manejo térmico nas áreas urbanas, com o objetivo de mitigar os efeitos do calor excessivo e melhorar a qualidade de vida das populações que habitam aglomerados urbanos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa revelou que, em 15 anos ocorrem 86 ondas de calor em dois municípios do centro oeste do Brasil – um nível crítico para a sobrevivência humana e a integridade ambiental. As ondas de calor se intensificarão, tornando-se cada vez mais letais em uma escala global. A aclimatação será insuficiente para sustentar a vida nas regiões tropicais, que se tornarão inabitáveis para os seres humanos. Além disso, a produção de alimentos será incapaz de atender à demanda devido às condições térmicas extremas, comprometendo a segurança alimentar e a própria sobrevivência das populações nessas áreas.

Para mitigar as intensas temperaturas das ondas de calor ou até mesmo das ilhas de calor urbanas geradas durante esses picos térmicos, o aprimoramento de praças públicas com mais

árvores e corredores verdes pode ser uma solução eficaz para resfriar os centros urbanos. A bioconstrução é uma alternativa que pode resistir a climas severos, oferecendo um local com regularidade térmica, aumentando o conforto e o bem-estar das pessoas que ali vivem.

Atividades voltadas para mitigar o calor nas áreas urbanas devem ser implementadas urgentemente para criar um ambiente mais saudável para todos. A busca por soluções para aliviar o calor nas cidades é uma responsabilidade compartilhada, exigindo o compromisso de todos os setores da sociedade. Somente por meio de ação coletiva será possível enfrentar os desafios impostos pelo aquecimento urbano e garantir uma boa qualidade de vida para as populações afetadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. Ilhas de calor superficiais: frequência da intensidade e variabilidade espacial em cidade de clima tropical continental. **Geo UERJ**, n. 34, p. 40959, 2019.

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade; DUBREUIL, Vincent. Intensity of urban heat islands in tropical and temperate climates. **Climate**, v. 5, n. 4, p. 91, 2017.

CLARKE, Bem; OTTO, Friederike; STUART-SMITH, Rupert; HARRINGTON, Luke. Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. **Environmental Research: Climate**, v. 1, n. 1, p. 012001, 2022. DOI: 10.1088/2752-5295/ac6e7d

CONRADIE, Shannon.; WOODBORNE, Stephan.; WOLF, Blair.; PESSATO, Anaïs.; MARIETTE, Mylene.; MCKECHNIE, Andrew. Avian mortality risk during heat waves will increase greatly in arid Australia during the 21st century. **Conservation Physiology**, v. 8, n. 1, p. coaa048, 2020. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa048>

CROWTHER, Thomas W; COVEY, K. et al. Mapping tree density at a global scale. **Nature**, v. 525, n. 7568, p. 201-205, 2015.

DA SILVA, Nikolai Espinoza; SANTOS, Carlos Antônio Costa dos; OLIVEIRA, Maria Betânia Leal de; SANTOS, Celso Augusto Guimarães; SILVA, Richarde Marques da; MISHRA, Manoranjan; FERREIRA, Rosaria Rodrigues. Assessment of urban heat islands and thermal discomfort in the Amazonia biome in Brazil: A case study of Manaus city. **Building and Environment**, v. 227, p. 109772, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109772>

DE LIMA, Gabriela Narcizo; RUEDA, Víctor Orlando Magaña. The urban growth of the metropolitan area of Sao Paulo and its impact on the climate. **Weather and Climate Extremes**, v. 21, p. 17-26, 2018.

FERREIRA, Fabiana Lourenço e Silva Ferreira; PEREIRA, Enio Bueno; LABAKI, Lucia Chebel. Fatores associados à distribuição da temperatura das superfícies em áreas urbanas: zonas climáticas locais e características espectrais. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 237-262, 2020.

GEIRINHAS, João; TRIGO, Ricardo; LIBONATI, Renata; COELHO, Caio; PALMEIRA, Ana Cristina. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1760-1776, 2018.

GHOBADI, Asad; KHOSRAVI, Mahmood; TAVOUSHI, Taghi. Surveying of heat waves impact on the urban heat islands: Case study, the Karaj City in Iran. **Urban climate**, v. 24, p. 600-615, 2018.

HANJRA, Munir; QURESHI, Ejaz. Global water crisis and future food security in an era of climate change. **Food policy**, v. 35, n. 5, p. 365-377, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.05.006>

HU, Litiao; MENG, Jing; XIONG, Chaoying; FANG, Wen; YANG, Jianxun; LIU, Miaomiao; BI, Jun; MA, Zongwei. City-level resilience to extreme weather shocks revealed by satellite nighttime lights in China. **Sustainable Cities and Society**, v. 101, p. 105167, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105167>

IKEDA-CASTRILLON, Solange Kimie et al. The Pantanal: A Seasonal Neotropical Wetland Under Threat. **The Palgrave Handbook of Global Sustainability**. p. 1–27, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Cuiabá (MT). **Cidades e Estado**. IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mt/cuiaba.html>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Porto Estrela (MT). **Cidades e Estado**. IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mt/porto-estrela.html>>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Banco de dados meteorológicos**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/servicos/bdmep-dados-hist%C3%B3ricos>>. Acesso em 15 de março de 2024.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2021.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>.

JUNGES, Amanda Heermann; TAZZO, Ivonete Fátima; CARDOSO, Loana Silveira; CERA, Josseana Ceolin. Avaliação da onda de calor ocorrida em janeiro de 2022 no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, v. 30, 2022.

KIARSI, Maryam.; AMIRESMAILI, Mohammadreza.; MAHMOODI, Mohammad Reza.; FARAHMANDNIA, Hojjat.; NAKHAEI, Nouzar.; ZAREIYAN, Armin.; AGHABABAEIAN, Hamidreza. Heat waves and adaptation: A global systematic review. **Journal of Thermal Biology**, p. 103588, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103588>

KJELLSTROM, Tord; KOVATS, Sari; LLOYD, Simon, HOLT, Tom; TOL, Richard. The direct impact of climate change on regional labor productivity. **Archives of environmental & occupational health**, v. 64, n. 4, p. 217-227, 2009. <https://doi.org/10.1080/19338240903352776>

KLEEREKOPER, Laura; VAN ESCH, Marjolein; SALCEDO, Tadeo Baldiri. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 64, p. 30-38, 2012.

KLINENBERG, Eric. Heat wave: A social autopsy of disaster in Chicago. **University of Chicago press**. 2015. DOI: 10.7208/chicago/9780226276212.001.0001

LÁZARO, Wilkinson Lopes; OLIVEIRA-JUNIOR, Ernandes Sobreira; DA SILVA, Carolina Joana; IKEDA-CASTRILLON, Solange Kimie; MUNIZ, Claumir Cesar. Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 32, p. e104, 2020. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X7619>

LEICHENKO, Robin; O'BRIEN, Karen; SOLECKI, William. Climate change and the global financial crisis: A case of double exposure. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 100, n. 4, p. 963-972, 2010. <https://doi.org/10.1080/00045608.2010.497340>

LIBONATI, Renata; GEIRINHAS, João; SILVA, Patrícia; RUSSO, Ana; RODRIGUES, Julia; BELÉM, Liz; NOGUEIRA, Joana; ROQUE, Fabio; DA CAMARA, Carlos; NUNES, Ana; MARENGO, José; TRIGO, Ricardo. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 1, p. 015005, 2022.

MALIK, Arunima; LAN, Jun; LENZEN, Manfred. Trends in global greenhouse gas emissions from 1990 to 2010. **Environmental science & technology**, v. 50, n. 9, p. 4722-4730, 2016.

MARENGO, Jose; SOUZA JR, Carlos; THONICKE, Kisten; BURTON, Chantelle; HALLADAY, Kate; BETTS, Richard; ALVES, Lincoln; SOARES, Wagner. Changes in climate and land use over the Amazon Region: Current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, 5, 228. 2017.

MARSDEN, Lydia; RYAN-COLLINS, Josh; ABRAMS, Jesse; LENTON, Timothy. Ecosystem tipping points: Understanding risks to the economy and financial system. **Institute for Innovation and Public Purpose**. 44p. 2024. <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/2024/apr/ecosystem-tipping-points>

MATSUMOTO, Ken'ichi. Climate change impacts on socioeconomic activities through labor productivity changes considering interactions between socioeconomic and climate systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 216, p. 528-541, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.127>

MOISA, Mitiku Badasa; DEJENE, Indale Niguse; ROBA, Zenebe Reta; GEMEDA Dessalegn Obsi. Impact of urban land use and land cover change on urban heat island and urban thermal

comfort level: a case study of Addis Ababa City, Ethiopia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 10, p. 736, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10414-z>

MOONEY, Harold; LARIGAUDERIE, Anne; CESARIO, Manuel; ELMQUIST, Thomas; HOEGH-GULDBERG, Ove; LAVOREL, Sandra; MACE, Georgina; PALMER, Margaret; SHOLES, Robert; YAHARA, Tetsukazu. Biodiversity, climate change, and ecosystem services. **Current opinion in environmental sustainability**, v. 1, n. 1, p. 46-54, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.07.006>

NAZARETH, M.; CUNHA, D.; GURGEL, Angelo. Climate Change, Agricultural Productivity and Economic Performance: an exercise using a Dynamic CGE Model. **AgEcon Search**. 15p. 2018. DOI [10.22004/ag.econ.275876](https://doi.org/10.22004/ag.econ.275876)

NOBRE, Carlos; SAMPAIO, Gilvan; BORMA, Laura; CASTILHA-RUBIO; SILVA, José; CARDOSO, Manoel. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016.

OUR WORLD IN DATA. **Number of trees per capita**. 2024. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/trees-per-capita>>. Acesso em: 7 jun. 2024.

PANDEY, Bhanu; GHOSH, Annesha. Urban ecosystem services and climate change: a dynamic interplay. **Frontiers in Sustainable Cities**, v. 5, p. 1281430, 2023. <https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1281430>

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E; STONE, D. A; MITCHELL, D. M; ROSIER, S; KING, A. D; LO, Y. T. E; PASTOR-PAZ. J; FRAME, D; WEHNER, M. On the attribution of the impacts of extreme weather events to anthropogenic climate change. **Environmental Research Letters**. 17, 024009. 2022. DOI 10.1088/1748-9326/ac44c8

RAZA, Aamir; SAFDAR, Muhammad; SHAHID, Muhammad Adnan; et al. Climate Change Impacts on Crop Productivity and Food Security: An Overview. In: Kanga, S., Singh, S.K., Shevkani, K., Pathak, V., Sajjan, B. (eds) *Transforming Agricultural Management for a Sustainable Future*. World Sustainability Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63430-7_8

SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; MELO, Maria Monalisa MS; BRITO, José Ivaldo Barbosa de. Tendências de Índices de Extremos Climáticos para o Estado do Amazonas e suas Relações com a TSM dos Oceanos Tropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 1-10, 2016.

SANTOS, Steffanny Cristina Pereira; DA SILVA, Charlei Aparecido. Ocorrência, intensidade e duração de ondas de calor em Dourados (MS) no período de 1980 a 2019. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 34, p. 601-619, 2024. <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.16155>

SENEVIRATNE, Sonia; ZHANG, Xuebin; ADNAN, Muhammad; BADI, Wafae; DEREZYNSKI, Claudine; LUCA, Alejandro Di; GHOSH, Subimal; ISKANDAR, Iskhaq; KOSSIN, James; LEWIS, Sophie; OTTO, Friederike; PINTO, Izidine; SATOH,

Masaki; VICENTE-SERRANO, Sergio; WEHNER, Michael; ZHOU, Botao. AND ALLAN, Richard. Weather and climate extreme events in a changing climate. In: Masson-Delmotte, V. P., Zhai, A., Pirani, S. L. and Connors, C. (eds.) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. **Cambridge University Press, Cambridge**, UK, pp. 1513-1766. 2021. DOI: [10.1017/9781009157896.013](https://doi.org/10.1017/9781009157896.013)

SILVEIRA, Rafael Brito; ALVES, Maikon; BARREIRO, Marcelo; BITENCOURT, Daniel. Ondas de calor nas capitais do Sul do Brasil e Montevideu-Uruguai. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, p. 1259-1276, 2019.

STILLMAN, Jonathon H. Heat waves, the new normal: summertime temperature extremes will impact animals, ecosystems, and human communities. **Physiology**, v. 34, n. 2, p. 86-100, 2019. <https://doi.org/10.1152/physiol.00040.2018>

TEWARI, Kushagra; TEWARI, Mukul; NIYOGI, Dev. Need for considering urban climate change factors on stroke, neurodegenerative diseases, and mood disorders studies. **Computational Urban Science**, v. 3, n. 1, p. 4, 2023.

UMEZAKI, Arissa Sary; RIBEIRO, Flavia Noronha Dutra; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; SOARES, Jacyra; MIRANDA, Regina Maura de. Numerical characterization of spatial and temporal evolution of summer urban heat island intensity in São Paulo, Brazil. **Urban Climate**, v. 32, p. 100615, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100615>

UNITED NATIONS - UN. **Framework Convention on climate change**. United Nations, 24 p. 1992.

VICEDO-CABRERA, Ana Maria; SCOVRONICK, N; SERA, F. et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. **Nature climate change**, v. 11, n. 6, p. 492-500, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>

YU, Zhaowu; GUO, Xienying; JØRGENSEN, Gertrud; VEJRE, Henrik. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities?. **Ecological Indicators**, v. 82, p. 152-162, 2017.

ZHAO, Hang.; LI, Guilin.; GUO, Dezheng.; LI, Han.; LIU, Qingxin.; XU, Baohua.; GUO, Xingqi. Response mechanisms to heat stress in bees. **Apidologie**, v. 52, p. 388-399, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00830-w>

CAPÍTULO 3

ARTIGO PUBLICADO: Sociedade Brasileira de Meio Ambiente e Controle de Qualidade do Ar de Interiores – BRASINDOOR <https://doi.org/10.29327/2410885.6.2-3>

O efeito de eventos climáticos extremos e nuvens de fumaça na qualidade do ar em ambientes externos e internos

The effect of extreme climate events and smoke clouds on air quality in outdoor and indoor environments

Cleverson Ricardo Soares Viana

Maísa Consuelo dos Santos

Wilkinson Lopes Lázaro

Adriana Gioda

Ernandes Sobreira Oliveira Junior

RESUMO

A quantidade de fumaça que pairou sobre o Brasil em agosto e setembro de 2024 fez com que os olhos do mundo se voltassem para as grandes queimadas ocorrentes, principalmente na Amazônia. Neste período os níveis de material particulado ($MP_{2,5}$), que são um dos principais causadores desta poluição, estiveram muito acima dos valores diários (24 h) recomendados pela Resolução N°. 506/2024 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) ($60 \mu g m^{-3}$) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) ($15 \mu g m^{-3}$). Entretanto, estes valores variaram entre os dias, as horas, tanto quanto entre locais (abertos ou fechados, por exemplo). Este trabalho tem como objetivo diagnosticar locais com maiores incidências de $MP_{2,5}$, considerando ambientes abertos e fechados. Para a realização desta pesquisa, utilizamos um analisador de $MP_{2,5}$ (TEMTOP M2000), comparando os dados entre ambientes indoor e outdoor. Os resultados revelaram que, em ambientes fechados (indoor), a concentração de $MP_{2,5}$ pode ser até quatro vezes superior aos limites recomendados pelos órgãos reguladores brasileiros, enquanto em ambientes abertos (outdoor) essa concentração pode chegar a ser 11 vezes maior. Entre os locais mais eficazes na redução da exposição, ambientes com condicionadores de ar apresentaram um potencial de redução de até 53%. Áreas verdes também atuaram como filtros naturais, diminuindo em até 22% os níveis de material particulado fino. Nosso estudo evidencia o impacto da extensa nuvem de fumaça tanto em ambientes internos quanto externos, sublinhando a urgência de implementar

medidas estratégicas para reduzir o número de queimadas. Além disso, é fundamental identificar ambientes com maior capacidade de mitigação dos efeitos à saúde humana, especialmente em casos de eventos climáticos extremos.

Palavras-chave: Poluição atmosférica; exposição; queimadas.

ABSTRACT

The amount of smoke lingering over Brazil in August and September 2024 has drawn the world's attention to the widespread wildfires, particularly in the Amazon. During this period, levels of particulate matter (PM_{2.5}), one of the main contributors to this pollution, were significantly above the daily (24-hour) limits recommended by Resolution No. 506/2024 of the National Environment Council (CONAMA) (60 $\mu\text{g.m}^{-3}$) and the World Health Organization (WHO) (15 $\mu\text{g.m}^{-3}$). However, these levels can vary from day to day, hour to hour, and between different locations (such as open or closed environments). Concerned about the alarming situation, this study aims to identify locations with higher incidences of PM_{2.5}, considering both open and closed environments. For this research, we used a PM_{2.5} analyzer (TEMTOP M2000), comparing data between indoor and outdoor environments. The results showed that in indoor environments, the concentration of PM_{2.5} can be up to four times higher than the limits recommended by Brazilian regulatory agencies, while in open environments, this concentration can be up to 11 times higher. Among the most effective places in reducing exposure, air-conditioned environments demonstrated a reduction potential of up to 53%. Green areas also acted as natural filters, reducing fine particulate matter levels by up to 22%. Our study highlights the impact of the extensive smoke cloud on both indoor and outdoor environments, underscoring the urgency of implementing strategic measures to reduce the number of wildfires. Additionally, it is crucial to identify environments with greater potential to mitigate health effects, especially in the context of extreme weather events.

Keywords: Air pollution; exposure; wildfires.

INTRODUÇÃO

As queimadas no Brasil têm se intensificado nas últimas décadas, especialmente em regiões sensíveis como o Amazônia e Pantanal (Viganó et al., 2018; MapBiomass, 2024), afetando significativamente a qualidade do ar e a saúde pública (Borchers-Arriagada et al., 2021; Caumo et al., 2022). Nos meses de seca no Bioma Pantanal há um grande acréscimo no número de queimadas, mesmo havendo um Decreto governamental proibitivo de liberação de licenças (Miranda et al., 2018). Durante os meses de estiagem observa-se uma dramática elevação nas concentrações de poluentes atmosféricos, principalmente do material particulado (MP_{2.5}) cujo limite recomendado pela Resolução CONAMA nº 506/2024 é de 60 $\mu\text{g m}^{-3}$ para a média de 24 horas. No entanto, em algumas localidades, os níveis chegaram a 900 $\mu\text{g m}^{-3}$, criando uma

emergência sanitária (Viana et al., 2024). Essa situação se torna ainda pior se for comparada com os valores das diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) que são bem mais restritivos ($15 \mu\text{g m}^{-3}$).

Os efeitos adversos do $\text{MP}_{2,5}$ na saúde humana já estão bem documentados na literatura científica (Requia et al., 2021; Oliveira et al., 2021). Partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 micrômetros podem penetrar profundamente no sistema respiratório e estão associadas a doenças respiratórias, cardiovasculares e aumento na mortalidade prematura (Ignotti et al., 2010). Devido ao seu tamanho extremamente reduzido, as partículas $\text{MP}_{2,5}$ conseguem penetrar profundamente no sistema respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares e, em muitos casos, ultrapassando a barreira alveolar para entrar na corrente sanguínea. Essa capacidade permite que essas partículas atinjam órgãos vitais, como o coração, pulmões e cérebro, resultando em uma série de complicações de saúde, incluindo doenças respiratórias, cardiovasculares, efeitos neurológicos, obesidade, parto prematura entre outras.

Além de suas implicações globais, o impacto do $\text{MP}_{2,5}$ pode ser observado em eventos concretos que destacam sua gravidade. Um exemplo notável é a "Nuvem de Fumaça" que envolveu o sudeste asiático durante os incêndios florestais na Indonésia, onde as concentrações de $\text{MP}_{2,5}$ chegaram a níveis até 10 vezes superiores ao considerado seguro pela OMS (Eilenberg, 2021). Esse evento resultou em milhares de internações por problemas respiratórios, além de um aumento significativo na mortalidade prematura na região (Kiely et al., 2021). Outro exemplo alarmante vem da cidade de Nova Délhi, na Índia, considerada uma das cidades mais poluídas do mundo. Durante o inverno, os níveis de $\text{MP}_{2,5}$ podem ultrapassar $400 \mu\text{g m}^{-3}$ (Ghude et al., 2017; Ali et al., 2019). Esse nível de poluição é comparável a fumar 20 cigarros por dia, resultando em crises de asma, bronquite crônica, e colocando em risco crianças e idosos de forma desproporcional (Palosa et al., 2013). Crianças expostas a altos níveis de $\text{MP}_{2,5}$ podem ter o desenvolvimento pulmonar prejudicado, o que agrava a questão do ponto de vista das gerações futuras (Dapper et al., 2016).

A exposição ao $\text{MP}_{2,5}$ não é um problema específico ao ambiente externo, pois grande parte dessa poluição também ocorre em ambientes internos, especialmente em áreas mal ventiladas (Jones et al., 2021). A qualidade do ar indoor pode ser afetada por diversas fontes, como o uso de fogões a lenha (Gioda et al., 2019), tabagismo, queima de incensos, e até produtos de limpeza doméstica (Kotzias et al., 2005; Luengas et al., 2015; Guo et al., 2020). Em regiões onde a poluição externa é elevada, como grandes centros urbanos, o $\text{MP}_{2,5}$ pode penetrar facilmente em residências, escritórios e escolas, agravando a exposição dos indivíduos (Liu et al., 2022). Pessoas que passam a maior parte do tempo em ambientes internos, como crianças, idosos e aqueles que trabalham em escritórios, estão igualmente vulneráveis aos impactos do $\text{MP}_{2,5}$. A poluição interna pode, em alguns casos, atingir níveis de concentração até maiores do que a poluição externa, devido à falta de ventilação adequada e ao acúmulo de fontes internas de poluentes (Chun et al., 2011).

Preocupados com a situação emergencial observadas em eventos de extremos climáticos de exposição à fumaça, este estudo tem como objetivo avaliar os níveis de $MP_{2,5}$ em diferentes ambientes (abertos e fechados), com foco em escolas, hospitais e residências, para diagnosticar os locais mais afetados e propor medidas mitigatórias.

METODOLOGIA

Os níveis de $MP_{2,5}$ ($\mu g\ m^{-3}$) foram amostrados dia 12 de setembro de 2024 em 8 locais no município de Cáceres, Mato Grosso. Na data, foram registradas intensas queimadas na região que cobriram de fumaça a cidade. Para avaliar a qualidade do ar nos ambientes internos e externos foi usado o sensor TEMTOP M2000 Air Quality Detector 2ª geração, com faixa de medição de 0 a $999\ \mu g\ m^{-3}$, onde foram registrados ao longo de 5 minutos, os níveis de $MP_{2,5}$.

Os locais selecionados para registro das concentrações de $MP_{2,5}$ fazem parte do uso cotidiano das pessoas como: Área de ambiente externo - sem a presença de edificações em um raio de 5 m, e sem arborização próxima; dentro de veículo automotor com o condicionador de ar ligado; dentro do veículo com as janelas abertas; sala de aula interna, área interna do ginásio de esportes; interior da área verde; borda da área verde; e o uso de bicicleta em ambiente externo próximo a vias com a presença de automóveis (Tabela 1).

Tabela 1 - Características dos locais de registro de material particulado de tamanho 2,5 micrometros.

Local de Registro	Características do local
Bicicleta	Percurso de 3,6 km - com velocidade média de 11 km/h - bicicleta de aro 29 - sensor posicionado na parte frontal da bicicleta
Borda Área Verde	Sensor posicionado à 1,5 metros do solo - com arbustos de porte médio de 2 m - com dossel fragmentado
Dentro do Carro Ar Ligado	Carro com vidros fechados e condicionador de ar ligado em 20 °C - com função de recircular o ar interno - sensor posicioanado na parte frontal do painel do carro
Dentro do Carro Janela Aberta	Carro com velocidade média de 20 km/h - 4 vidros abertos - sensor posicioanado na parte frontal do painel do carro
Ginásio Área Interna	Em formato circular - com telhado em aproximadamente 15 m de altura e quadra de tamanho 20 x 40 m. O ambiente apresenta abertura para a ventilação na porção mais alta do teto.
Interior Área Verde	Sensor posicionado à 1,5 m do solo no interior de mata com árvores com altura média de 5 m - com dossel fechado
Sala Interna	Com condicionador de ar de potência 12 mil BTUs ligado em 21 °C - de tamanho 3,5 x 7,5 m - sensor posicionado à 1,5 m de altura
Área Externa	Sensor posicionado em uma abertura com raio de 5 m - sem influência de árvores - posicionado à 1,5 m de altura.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

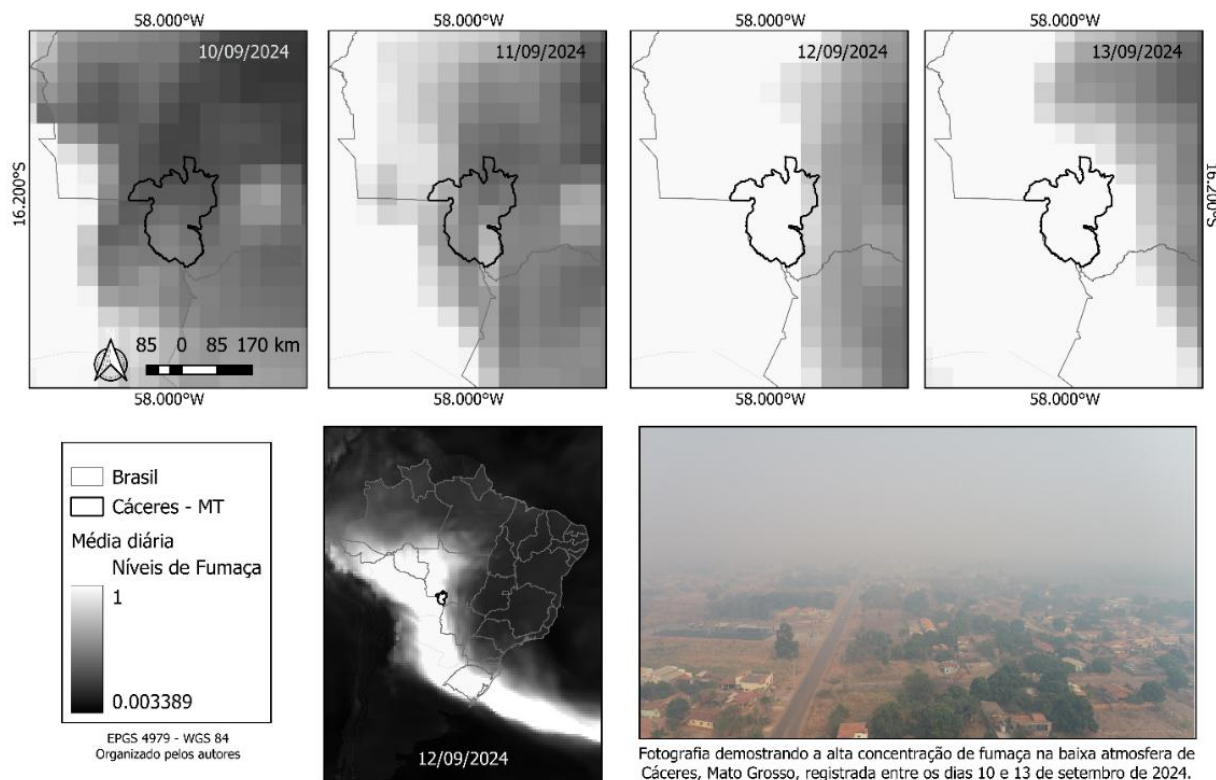
Dados da dinâmica da nuvem de fumaça foram obtidos através do INPE (https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/riscofogo_meteorologia/observado/fumaca_aod469/?C=M;O=D) acessado no dia 15 de setembro de 2024. Os dados foram baixados em formato TIFF e organizados no software QGIS® em um conjunto de imagens do comportamento da movimentação da nuvem de fumaça ao longo do gradiente continental sulamericano. Os dados de queimadas foram obtidos também no INPE (<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/#exportar-dados>) acessado em 15 de setembro de 2024.

Após o registro dos níveis de $MP_{2,5}$, os dados registrados foram dispostos em planilhas do Excel®. Após a conferência dos dados, optamos pelo uso de um teste T, pareado para se comparar os locais de coleta indoor e outdoor, considerando significância estatística quando $p < 0,05$. Para realização do teste estatístico fez-se o uso do Python (biblioteca Pandas) e para gerar os gráficos a biblioteca Seaborn.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre os dias 10 a 13 de setembro pode-se observar uma nuvem de fumaça proveniente da Amazônia em direção à região pantaneira (Figura 1). Esta nuvem de fumaça tem um comportamento bastante similar ao dos rios voadores, águas que se originam no Atlântico, passam e são alimentadas pela evapotranspiração da floresta amazônica em uma corrente aérea que dobra na cordilheira dos andes em direção ao sul das Américas (Fearnside, 2015). A figura demonstra este mesmo comportamento, também destacando a origem principal na Amazônia, mas se intensificando com o acumulado de outras regiões.

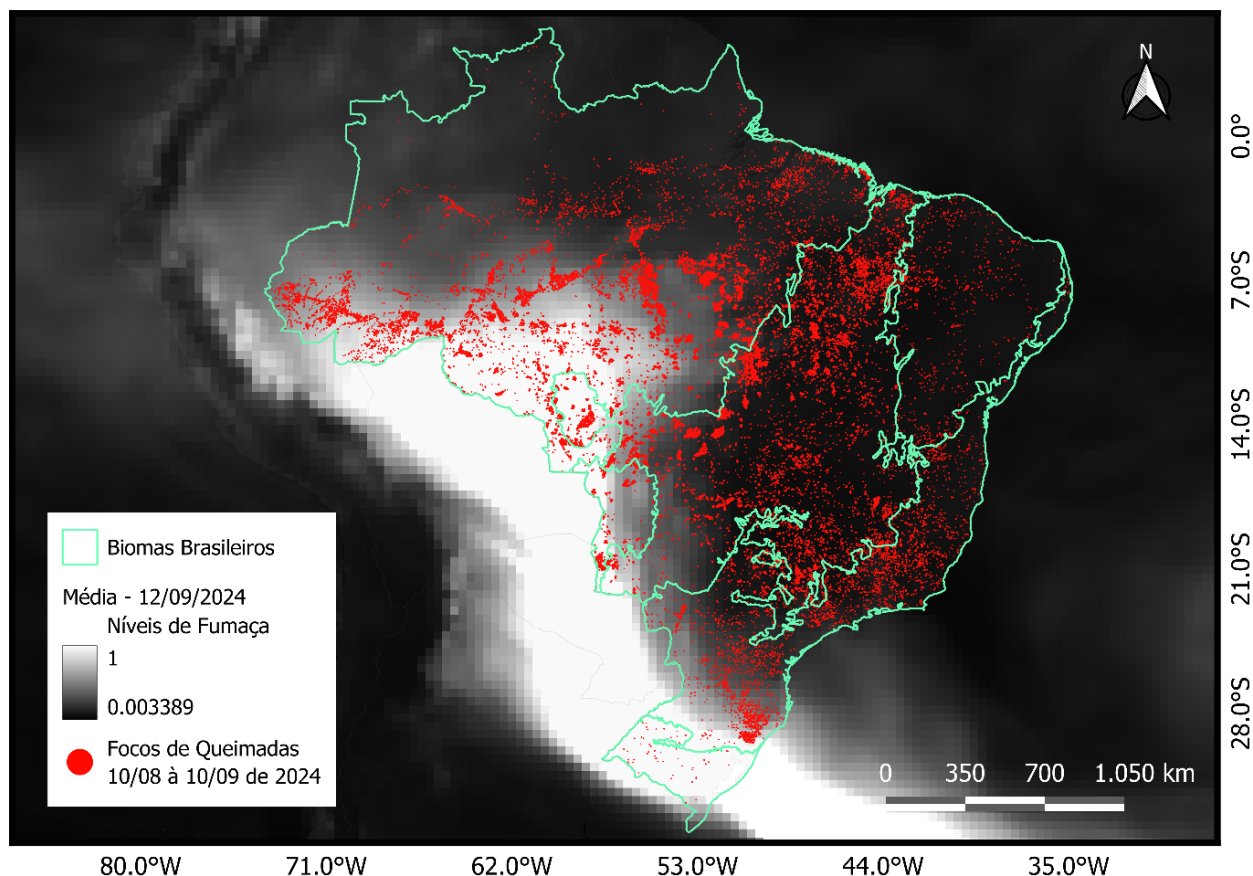
Figura 1. Mapa de densidade de fumaça ao longo do município de Cáceres, MT entre os dias 10 e 13 de setembro 2024.



Fonte: Organizado pelos autores, através de dados do INPE (2024). Note que o índice indica maior quantidade de fumaça quanto mais próximo a 1, com a cor branca.

De fato, em dias anteriores ao dia 10 de setembro as queimadas foram bastante intensas na região amazônica e com grandes densidades desde o norte ao sul da Amazônia e restante do país na região ao sul (Figura 2). Observa-se que os Biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal detêm os maiores números de focos, ressaltando que a fumaça que paira sobre esses biomas ocorre em função da grande quantidade de focos de queimadas e das correntes de vento. A seca na região, a qual vem se intensificando nos últimos anos (Lázaro e Oliveira Junior et al 2020) pode também ser um fator agravante para este número de queimadas, o que não exime a atividade humana para a ignição dos eventos de queimas.

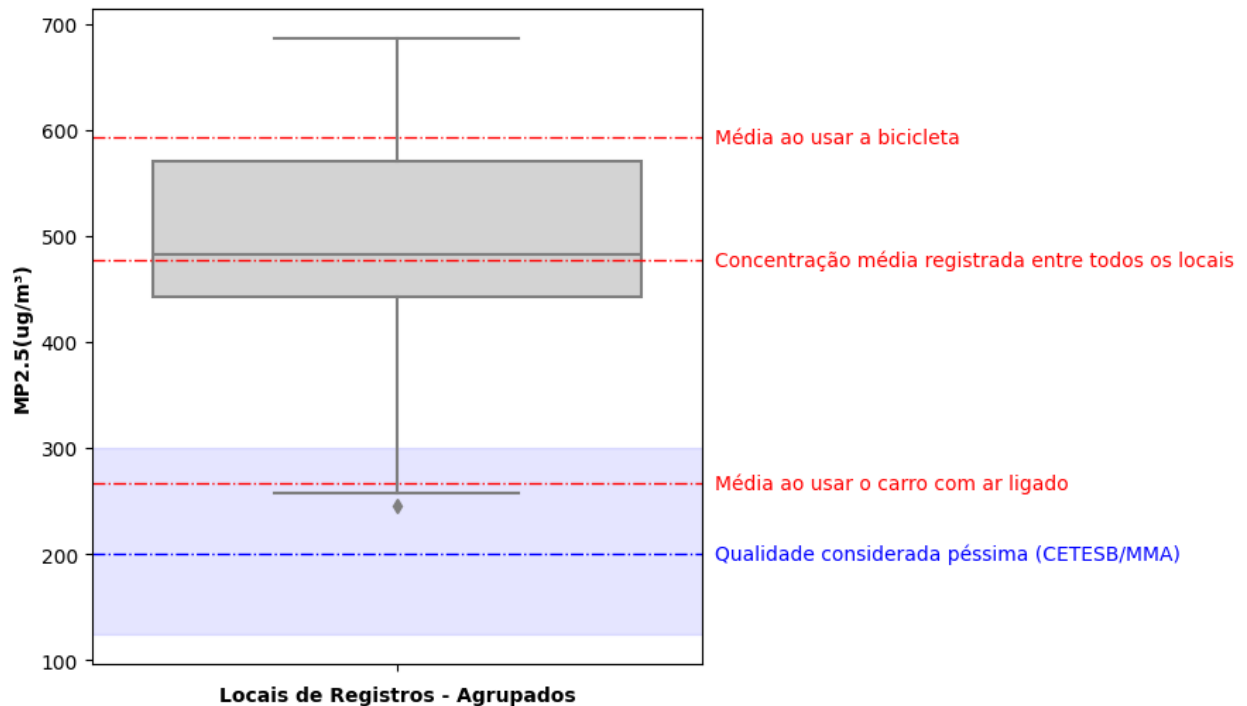
Figura 2. Identificação de focos de queimadas acumulados no Brasil entre os dias 10 de agosto e 10 de setembro de 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os níveis de $MP_{2,5}$ apresentaram uma média de $477 \pm 120 \mu\text{g m}^{-3}$ no período de registro entre todos os locais, 8 vezes acima do recomendado pela Resolução CONAMA 506/2024, a qual estabelece valores máximos de $60 \mu\text{g m}^{-3}$ para cada 24 h. Em seu pico máximo, o registro de $MP_{2,5}$ foi $686 \mu\text{g m}^{-3}$. Ambos os valores (média e pico máximo encontrados neste estudo) são considerados péssimos pelo índice de qualidade do ar estabelecido pelo CONAMA, 2024; (Figura 3).

Figura 3. Agrupamento dos registros de $MP_{2,5}$ durante o período estudado. A faixa em azul representa a recomendação da CONAMA que determina níveis entre 125 e 300 $\mu g\ m^{-3}$ péssimos para a saúde humana. Linhas pontilhadas em vermelho denotam as concentrações médias encontradas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Essa concentração de $MP_{2,5}$ pode ser considerada de risco significativo para a saúde pública (Thurston et al., 2017). A exposição a material particulado fino, especialmente em concentrações oito vezes superiores ao recomendado, está intimamente associada a um aumento do risco de mortalidade, devido ao seu pequeno tamanho, pode penetrar profundamente nos pulmões e entrar na corrente sanguínea, levando a doenças respiratórias e cardiovasculares além de agravar condições pré-existentes como asma e bronquite (Sigsgaard et al., 2024). A exposição crônica a níveis tão elevados aumenta a probabilidade de desenvolvimento de câncer de pulmão, ataques cardíacos e acidentes vasculares cerebrais, sendo particularmente perigosa para populações vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com condições de saúde pré-existentes (OMS, 2021; Weichenthal et al., 2022).

A especificidade dos altos níveis de poluição atmosférica registrados no dia 12 de setembro de 2024 evidencia o impacto direto dessas concentrações no cotidiano das pessoas. Embora não sejam imediatamente fatais, deixam sequelas que podem perdurar por anos, comprometendo a qualidade de vida dos indivíduos afetados (EPA, 2020).

Entre os locais de registros, a área externa apresentou a maior média de $MP_{2,5}$ ($568 \pm 7\ \mu g\ m^{-3}$), comparada com as áreas internas ($298 \pm 4\ \mu g\ m^{-3}$; $t: -148,8$; $p = < 0.01$). Ainda em ambiente aberto (externo), como no uso de bicicletas, a concentração de $MP_{2,5}$ obteve maiores concentrações médias ($593 \pm 72\ \mu g\ m^{-3}$) do que a média geral de ambiente externo, mas sem diferença significativa (Tabela 2). Andar de bicicleta, dependendo do trajeto, pode resultar em uma maior exposição ao material particulado. Isso ocorre devido aos veículos automotores, que,

através do processo de combustão, emitem e elevam os níveis de concentração de partículas finas na atmosfera, assim potencializam os níveis de $MP_{2,5}$ quando se associam a queimadas. À medida que os veículos queimam combustível, eles liberam uma variedade de poluentes, incluindo $MP_{2,5}$, que contribuem significativamente para a poluição do ar, especialmente em áreas urbanas com tráfego intenso (Zhang et al., 2013). Consequentemente, ciclistas que atravessam essas áreas podem enfrentar uma exposição aumentada a esses poluentes nocivos, o que pode representar riscos graves à saúde ao longo do tempo.

Tabela 2. Concentrações ($\mu g m^{-3}$) de material particulado ($MP_{2,5}$) com as médias, desvios, máximas e mínimas de cada local de registro. Ao longo do período de registro, foram estabelecidas a medição a cada minuto por 5 minutos.

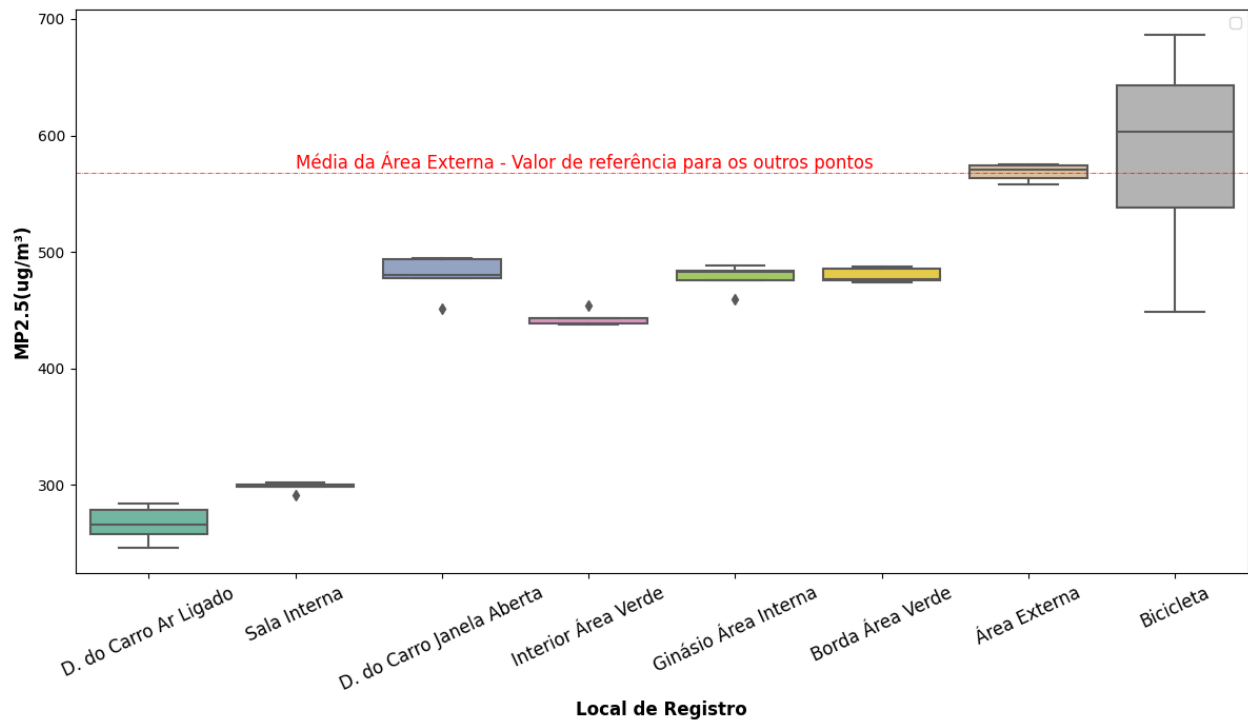
Ponto	Média	Mínimo	Máximo
Bicicleta	593 ± 72	449	686
Borda Área Verde	480 ± 6	474	488
Dentro do Carro Ar Ligado	267 ± 15	246	284
Dentro do Carro Janela Aberta	480 ± 18	451	495
Ginásio Área Interna	478 ± 11	460	489
Interior Área Verde	443 ± 7	438	454
Sala Interna	298 ± 4	291	302
Área Externa	568 ± 7	558	575

*Resolução CONAMA nº 506/2024 estabelece uma média de $60 \mu g m^{-3}$ para cada 24 horas. Fonte: Base de dados dos autores, 2024.

A razão da concentração interna/externa é menor que 1, indicando que as fontes de partículas nos espaços fechados são provenientes de áreas externas. As concentrações foram menores em todos os ambientes internos do estudo, em torno de três vezes, mas ainda são altos o suficiente para causar problemas de saúde. Para a OMS tanto os níveis internos quanto os externos devem seguir as mesmas recomendações, ou seja, $15 \mu g m^{-3}$. A norma ABNT NBR 17.037, 2023 Qualidade do ar interior em ambientes não residenciais climatizados artificialmente, que substituiu a RE-09 – Resolução da ANVISA de 2003, estabelece os níveis de $MP_{2,5}$ como $25 \mu g m^{-3}$ no ar, como indicador adequado da qualidade do ar e limpeza do ambiente climatizado. Devido às características de cada local, os níveis de $MP_{2,5}$ variam nos ambientes internos. Por exemplo, o simples fato de estar abrigado em local com paredes, como em um ginásio de esportes, a concentração média de $MP_{2,5}$ reduziu 18 % ($478 \pm 11 \mu g m^{-3}$), ao se comparar com a área externa ($t = 14.73$; $p < 0,01$). Já em uma sala de aula com o condicionador de ar ligado, a concentração reduziu 47 % ($298 \pm 4 \mu g m^{-3}$ ($p < 0,01$)). Essa redução se deve ao fato de a sala ter permanecido com as janelas e portas fechadas durante o uso do condicionador de ar. Importante salientar que o condicionador de ar de janela e o modelo tipo split não fazem a filtração de partículas pequenas, tendo, portanto, pouco efeito na purificação do ar.

Áreas verdes podem funcionar como filtros em relação à exposição à fumaça. As folhas, caules e troncos das árvores agem como superfícies que capturam partículas suspensas no ar. As partículas finas podem se aderir às superfícies das folhas, sendo removidas da atmosfera (Przybysz et al., 2019; Popek et al., 2022). Nosso estudo mostrou uma redução de 22 % de concentração de $MP_{2,5}$ ($443 \pm 6 \mu g m^{-3}$) no interior de uma área verde em comparação com a área externa aberta ($p < 0,01$; Figura 4). Mesmo na borda da área verde a concentração de $MP_{2,5}$ foi reduzida em 16 % ($480 \pm 6 \mu g m^{-3}$; $p < 0,01$).

Figura 4. Locais de registro de material particulado ($MP_{2,5}$). A linha tracejada em vermelho representa o valor médio da Área Externa, no qual foi utilizado como valor de referência para os outros locais de registro.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Dentre todos os ambientes estudados, o interior veículo, com o condicionador de ar ligado, foi o ambiente com menor exposição ao $MP_{2,5}$ ($267 \pm 15 \mu g m^{-3}$; $p < 0,05$; Figura 4). Este valor é 53 % menor do que no ambiente externo. Mesmo assim, os níveis foram bem mais altos que os recomendados. De um modo geral, os filtros do condicionador de ar dos veículos tem uma maior eficiência. Dependendo da marca do filtro de cabine e da manutenção a remoção de partículas com tamanho inferior a $1 \mu m$ pode atingir 90 %, como é o caso dos filtros HEPA.

Em situações de alta poluição atmosférica, as partículas finas conseguem infiltrar-se em ambientes fechados o que compromete a proteção contra os efeitos adversos dos poluentes. Isso ressalta a necessidade de medidas adicionais para mitigar a exposição, tanto em áreas externas quanto internas, durante períodos de alta concentração de poluentes.

Ao evidenciar os níveis de concentração de poluentes atmosféricos acima dos limites estabelecidos, tanto estar em ambientes externos ou realizar atividades ao ar livre pode ser prejudicial à saúde a curto prazo. A exposição prolongada a esses poluentes pode agravar os riscos,

levando ao desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares, e, em casos extremos, até à morte (Gouveia, 2000; Pope et al, 2009). A relação entre a qualidade do ar e os impactos na saúde reforça a necessidade de medidas preventivas para amenizar a exposição a altos níveis de poluição atmosférica por material particulado de tamanho 2,5 micrometros.

CONCLUSÃO

Nosso estudo destacou a relação entre a exposição à fumaça em ambientes internos e externos em um evento de grande quantidade de queimadas no Brasil, principalmente na região amazônica. Observa-se que mesmo em áreas internas a média é considerada alta com categorização de qualidade do ar péssimo, chegando a ser no mínimo 4 vezes mais alta do que os valores preconizados pelas normas brasileiras. Este valor pode chegar até 11 vezes mais alto do que os valores da normatização dependendo do local de exposição.

Em caso de prática de atividade física, observou-se que em ambiente aberto, como sob o uso de bicicletas ou em qualquer outra área aberta, estes valores podem ser bastante prejudiciais para a saúde humana. Em contrapartida, assim como esperado, áreas fechadas e verdes fornecem melhores condições em relação à exposição ao MP_{2,5}. Entretanto, esses locais não estão exímios das altas concentrações de MP_{2,5}.

Evidenciar eventos extremos com picos de poluição atmosférica se faz essencial para a promoção de medidas mitigatórias. Em exemplo: aumentar pontos de registros de concentração de material particulado, a nível de efetivar as notificações, gerando informações técnicas e precisas referente a qualidade do ar urbano; aumentar o número de áreas verdes municipais que possam atuar como filtro para a melhoria da qualidade do ar urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, K.; ACHARJA, P.; TRIVEDI, D. K.; KULKARNI, R.; PITHANI, P.; SAFAI, P. D.; RAJEEVAN, M. Characterization and source identification of PM_{2.5} and its chemical and carbonaceous constituents during Winter Fog Experiment 2015–16 at Indira Gandhi International Airport, Delhi. **Science of the Total Environment**, v. 662, p. 687-696, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.249.
- BORCHERS-ARRIGADA, N.; BOWMAN, D. M.; PRICE, O.; PALMER, A. J.; SAMSON, S.; CLARKE, H.; JOHNSTON, F. H. Smoke health costs and the calculus for wildfires fuel management: a modelling study. **The Lancet Planetary Health**, v. 5, n. 9, p. e608-e619, 2021. DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00198-4.
- CAUMO, S.; LÁZARO, W. L.; OLIVEIRA JUNIOR, E. S.; BERINGUI, K.; GIODA, A.; MASSONE, C. G.; HACON, S. Human risk assessment of ash soil after 2020 wildfires in Pantanal biome (Brazil). **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 15, n. 12, p. 2239-2254, 2022. DOI: 10.1007/s11869-022-01248-2.

CHEN, C.; ZHAO, B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 2, p. 275-288, 2011. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.09.048.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução CONAMA N° 506/2024**. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2024. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atonormativo&id=756. Acesso em: 23 set. 2024.

DAPPER, S. N.; SPOHR, C.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 30, n. 86, p. 83-97, 2016. DOI: 10.1590/S0103-40142016.00100006.

EILENBERG, M. The last enclosure: smoke, fire and crisis on the Indonesian forest frontier. **The Journal of Peasant Studies**, v. 49, n. 5, p. 969-998, 2022. DOI: 10.1038/s41467-021-27353-x.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen, Oxides of Sulfur, and Particulate Matter-Ecological Criteria**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2020.

FEARNSIDE, P. M. Rios voadores e a água de São Paulo 1: a questão levantada. **Caderno CRH**, v. 25, n. 64, p. 87-98, 2015. Disponível em: https://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2015/Rios_voadores-S%C3%A9rie_completa.pdf. Acesso em: 23 set. 2024.

GOUVEIA, N.; FLETCHER, T. Time series analysis of air pollution and mortality: effects by cause, age and socioeconomic status. **Journal of Epidemiology & Community Health**, v. 54, n. 10, p. 750-755, 2000. DOI: 10.1136/jech.54.10.750.

GHUDE, S. D.; BHAT, G. S.; PRABHAKARAN, T.; JENAMANI, R. K.; CHATE, D. M.; SAFAI, P. D.; KARIPOT, A. K.; KONWAR, M.; PITHANI, P.; SINHA, V.; RAO, P. S. P.; DIXIT, S. A.; TIWARI, S.; TODEKAR, K.; VARPE, S.; SRIVASTAVA, A. K.; BISHT, D. S.; MURUGAVEL, P.; ALI, K.; RAJEEVAN, M. Winter fog experiment over the Indo-Gangetic plains of India. **Current Science**, v. 112, n. 4, p. 767-784, 2017. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24912578>.

GIODA, A.; TONIETTO, G. B.; LEON, A. P. D. Exposição ao uso da lenha para cocção no Brasil e sua relação com os agravos à saúde da população. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 24, n. 8, p. 3079-3088, 2019. DOI: 10.1590/1413-81232018248.23492017.

GUO, S. E.; CHI, M. C.; LIN, C. M.; YANG, T. M. Contributions of burning incense on indoor air pollution levels and on the health status of patients with chronic obstructive pulmonary disease. **PeerJ**, v. 8, p. e9768, 2020. DOI: 10.7717/peerj.9768.

IGNOTTI, E.; VALENTE, J. G.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; HACON, S. S.; ARTAXO, P. Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon region. **Revista de Saúde Pública**, v. 44, p. 121-130, 2010. DOI: 10.1590/S0034-89102010000100013.

JONES, E. R.; LAURENT, J. G. C.; YOUNG, A. S.; MACNAUGHTON, P.; COULL, B. A.; SPENGLER, J. D.; ALLEN, J. G. The effects of ventilation and filtration on indoor PM_{2.5} in

- office buildings in four countries. **Building and Environment**, v. 200, p. 107975, 2021. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107975.
- KIELY, L.; SPRACKLEN, D. V.; ARNOLD, S. R.; PAPARGYROPOULOU, E.; CONIBEAR, L.; WIEDINMYER, C.; ADRIANTO, H. A. Assessing costs of Indonesian fires and the benefits of restoring peatland. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 7044, 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-27353-x.
- KOTZIAS, D.; KOISTINEN, K.; KEPHALOPOULOS, S.; SCHLITT, C.; CARRER, P.; MARONI, M.; SEIFERT, B. **Final report of the INDEX project, critical appraisal of the setting and implementation of indoor exposure limits in the EU**. Luxembourg: Office for Official Publication of the European Communities, 2005. Disponível em: <https://pure.au.dk/portal/en/publications/the-index-project-critical-appraisal-of-the-setting-and-implement>.
- LÁZARO, W. L.; OLIVEIRA-JÚNIOR, E. S.; SILVA, C. J.; CASTRILLON, S. K. I.; MUNIZ, C. C. Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 32, p. e104, 2020. DOI: 10.1590/S2179-975X4819.
- LIU, Y.; MA, H.; ZHANG, N.; LI, Q. A systematic literature review on indoor PM2.5 concentrations and personal exposure in urban residential buildings. **Heliyon**, v. 8, n. 8, 2022. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10174.
- LUENGAS, A.; BARONA, A.; HORT, C.; GALLASTEGUI, G.; PLATEL, V.; ELIAS, A. A review of indoor air treatment technologies. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, p. 499-522, 2015. DOI: 10.1007/s11157-015-9363-9.
- MAPBIOMAS. **Mapbiomas Alertas**, 2024. Disponível em: [https://plataforma.alerta.mapbiomas.org/mapa?monthRange\[0\]=2019-01&monthRange\[1\]=2024-07&sources\[0\]=All&territoryType=all&authorization=all&embargoed=all&locationType=alertcode&activeBaseMap=7&map=-14.264383%2C-54.316406%2C4](https://plataforma.alerta.mapbiomas.org/mapa?monthRange[0]=2019-01&monthRange[1]=2024-07&sources[0]=All&territoryType=all&authorization=all&embargoed=all&locationType=alertcode&activeBaseMap=7&map=-14.264383%2C-54.316406%2C4). Acesso em: 23 set. 2024.
- MIRANDA, M.; NEVES, L.; KREITLOW, J.; NEVES, S. M.; NEVES, R. Distribuição de queimadas e mudanças na cobertura vegetal e uso da terra no bioma pantanal, Cáceres-Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 19, 2018. DOI: 10.14393/RCG196508.
- OLIVEIRA, T. L.; SANTOS, C. M.; MIRANDA, L. D. P.; NERY, M. L. F.; CALDEIRA, A. P. Fatores associados ao custo das internações hospitalares por doenças sensíveis à Atenção Primária no Sistema Único de Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 26, p. 4541-4552, 2021. DOI: 10.1590/1413-812320212610.10862021.
- POLOSA, R.; THOMSON, N. C. Smoking and asthma: dangerous liaisons. **European Respiratory Journal**, v. 41, n. 3, p. 716-726, 2013. DOI: 10.1183/09031936.00073312.
- POPE, C. A.; EZZATI, M.; DOCKERY, D. W. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. **New England Journal of Medicine**, v. 360, n. 4, p. 376-386, 2009.

CONCLUSÃO GERAL

Esta pesquisa, estruturada em três eixos complementares, analisou a dinâmica climática urbana com foco em eventos extremos (ondas de calor), índices bioclimáticos e poluição atmosférica, revelando que os centros urbanos estão cada vez mais vulneráveis a esses fenômenos. Os resultados evidenciam que as cidades, especialmente em regiões de transição ecotonal entre os biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, enfrentam uma sobreposição de dinâmicas térmicas ao longo dos anos, exacerbando riscos à saúde pública devido a índices bioclimáticos acima dos níveis seguros e à exposição crônica a nuvens de poluição particulada.

A crise climática já não é uma projeção futura, mas uma realidade que redefine nosso presente, intensificando eventos extremos, degradando ecossistemas e ampliando desigualdades urbanas. A inércia política diante desse cenário é inadmissível: cada ano de atraso na implementação de medidas climáticas amplia a vulnerabilidade das futuras gerações. Nas cidades, ilhas de calor combinadas com poluentes atmosféricos criam "armadilhas térmicas", expondo milhões a condições insalubres.

A aclimação humana a essa realidade exige uma transformação radical no planejamento urbano. A urbanização caótica, além de agravar a crise climática, representa uma falha sistêmica que compromete o acesso a recursos vitais como água potável, alimentos e serviços de saúde. Para reverter esse quadro, a resiliência urbana deve ser construída com base em soluções naturais: a implantação de infraestrutura verde (como parques urbanos e corredores biodiversos) para mitigar ilhas de calor; a restauração de corpos d'água para regularizar ciclos hidrológicos; e políticas rigorosas de qualidade do ar para reduzir o impacto do material particulado (MP_{2,5}), associado a doenças respiratórias e cardiovasculares.

O estudo demonstra que os índices bioclimáticos acima do recomendado as ondas de calor e poluição atmosférica atuam como "assassinos silenciosos", com efeitos cumulativos na saúde pública. Essa combinação não ameaça apenas o conforto térmico, mas a própria sobrevivência em ambientes urbanos. Cidades que negligenciarem essa correlação enfrentarão colapsos sanitários e fluxos migratórios climáticos em escala sem precedentes.

As soluções propostas alinham-se de forma incontestável aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. O ODS 11 demanda cidades resilientes e justas climaticamente; o ODS 3 exige a redução de mortes evitáveis por estresse térmico e poluição; e o ODS 13 cobra ações imediatas para adaptação baseada em ecossistemas. Esses compromissos não são negociáveis – são condições mínimas para um presente viável nos centros urbanizados.

Este estudo transcende o diagnóstico científico; é um alerta vermelho para a ação coletiva. A janela de oportunidade para evitar cenários irreversíveis está se fechando rapidamente. Para evitar o colapso, exigem-se três medidas urgentes: (1) políticas urbanas com metas climáticas mensuráveis e fiscalizáveis; (2) investimentos emergenciais em infraestrutura verde e fomento a

tecnologias que são eficientes em aclimatar as pessoas que vivem nos centros urbanizados; e (3) cooperação local para financiar cidades que suportem a crise climática. A escolha que define o contexto climático é clara e imediata: ou nos unimos hoje para transformar o presente, ou seremos lembrados amanhã como a geração que condenou o futuro.

APÊNDICES

Atividades realizadas ao longo do mestrado

Artigos em periódicos

VIANA, CLEVERSON RICARDO SOARES; SANTOS, MAÍSA CONSUELO DOS; LÁZARO, WILKINSON LOPES; GIODA, ADRIANA; OLIVEIRA JUNIOR, ERNANDES SOBREIRA. O efeito de eventos climáticos extremos e nuvens de fumaça na qualidade do ar em ambientes externos e internos. *Revista Brasindoor - Sociedade Brasileira de Meio Ambiente e Controle de Qualidade de Ar de Interiores*, v. 6, n. 2, p. 30–43, 2024. <https://doi.org/10.29327/2410885.6.2-3>

BISINOTO, GUSTAVO DOMINGOS SAKR; **VIANA, CLEVERSON RICARDO SOARES;** PEREIRA, THIAGO FERREIRA; NASCIMENTO, NATÁLIA TALITA ARAÚJO; ZANIN, RODRIGO BRUNO; OLIVEIRA JUNIOR, ERNANDES SOBREIRA. Panorama global das pesquisas sobre crédito de carbono: da semente de Quioto aos ventos da COP28. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, v. 23, p. e8540, 2025. <https://doi.org/10.55905/oelv23n1-031>.

SOBREIRA, ERNANDES; LÁZARO, WILKINSON LOPES; VITORINO, BRENO DIAS; FROTA, ANGÉLICA VILAS BOAS DA; YOUNG, CARLOS EDUARDO FRICKMANN; CAMPOS, DERICK VICTOR DE SOUZA; **VIANA, CLEVERSON RICARDO SOARES;** DE OLIVEIRA, EDVAGNER; LÓPEZ-RAMIREZ, LUIS; DE SOUZA, ACISA RAIMUNDA; SILVA, DIONEI JOSÉ DA; IGNOTTI, ELIANE; HACON, SANDRA; IGNÁCIO, ÁUREA REGINA ALVES; MUNIZ, CLAUMIR CÉSAR; FILHO, MANOEL DOS SANTOS; BOGONI, JULIANO A. Wildfires and their toll on Brazil: Who's counting the cost? *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 1, p. 1, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2025.06.003>.

VITORINO, BRENO DIAS; FROTA, ANGÉLICA VILAS BOAS DA; SOBREIRA, ERNANDES; LÁZARO, WILKINSON LOPES; YOUNG, CARLOS EDUARDO FRICKMANN; **VIANA, CLEVERSON RICARDO SOARES;** BORGES, FERNANDO VIEIRA; LÓPEZ-RAMIREZ, LUIS; OLIVEIRA, EDVAGNER DE; SILVA, DIONEI JOSÉ DA; CASTRILLON, SOLANGE KIMIE IKEDA; MUNIZ, CLAUMIR CÉSAR; CAMPOS, DERICK VICTOR DE SOUZA; SANTOS FILHO, MANOEL DOS; BOGONI, JULIANO A. The imminent environmental setback in Brazil driven by the Devastation Bill. *Biota Neotropica*. v. 25, p. 1/e20251829, 2025. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2025-1829>.

Capítulo de livro

VIANA, C. R. S.; SOUZA, A. R.; OLIVEIRA JUNIOR, E. S.; MUNIZ, C. C. A experiência e importância da realização do estágio do Bacharelado em Ciências Biológicas na área de pesquisa relacionada a macroinvertebrados aquáticos. In: CERQUEIRA, B. R. S.; SOUZA, L. C. A. B.; PUGLIESE, A.; MEDEIROS, D. M. S.; HENRIQUE, V. H. O. (Org.). *E a vida continua: vazios e esperanças no Ensino de Ciências e de Biologia – Coletânea de trabalhos do V Encontro Regional de Ensino de Biologia da Regional I da SBEnBio*. São Paulo: Pimenta Cultural, 2023. p. 131-138. 1676-0611

Palestras e cursos ministrados

VIANA, C. R. S. Era Sol que me faltava: O clima urbano está uma "palha-assada". 2025.

VIANA, C. R. S.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA JUNIOR, E. S. O ar que você respira te mata! 2025.

VIANA, C. R. S.; FERREIRA, D. D.; PEREIRA, T. F.; OLIVEIRA JUNIOR, E. S. *QGIS do básico ao avançado*. 2025.

Apresentações de trabalhos

VIANA, C. R. S.; FERREIRA, D. D.; PEREIRA, T. F.; OLIVEIRA JUNIOR, E. S. Usando o QGIS para a visualização de dados geoespaciais. 2024.

VIANA, C. R. S. SABERES EM ARTE. 2024.

VIANA, C. R. et al. Extensão universitária em ação: conversas e percepções da qualidade do ar urbano. 2024.

SOARES VIANA, C. R. et al. Impacto dos incêndios no Pantanal: elevação dos níveis de material particulado em quase 15 vezes o máximo permitido. 2024.

SOARES VIANA, C. R. et al. Pulso silencioso: a batalha do Rio Paraguai contra o tempo e o fogo. 2024.

SOARES VIANA, C. R. et al. Características e tendências climáticas de Cáceres, Mato Grosso. 2024.

SOARES VIANA, C. R. OLIVEIRA-JUNIOR, E. S. Clima lá, clima aqui: a temperatura está normal aí na sua cidade? 2024.

Notas técnicas

VIANA, C. R. et al. A de árvore. 2024.

VIANA, C. R. et al. Nota Técnica Conjunta n.º 04/2024. 2024.

VIANA, C. R. et al. Transformações eco-lógicas em tempos de aclimação. 2024.

Projetos de pesquisa

Mapeamento de Estoque de Carbono em áreas prioritárias para incentivo a Bioeconomia, preservação ambiental e fomento econômico. Cleverson Ricardo Soares Viana - Integrante / ERNANDES SOBREIRA OLIVEIRA JUNIOR - Integrante / BISINOTO, GUSTAVO DOMINGOS SAKR - Coordenador / Beatriz Ferraz Buhler - Integrante / FRANCISCO LLEDO DOS SANTOS - Integrante / TACIANA CRISTINA BRASILEIRO DE MORAES BISINOTO - Integrante / VALQUIRIA LAURA DE OLIVEIRA CORREA - Integrante / RODRIGO BRUNO ZANIN - Integrante / VANESSA RIBEIRO GARCIA LEAL - Integrante / Josiane Santos Batista Carioca de Paula - Integrante / MATHEUS MAGNUM DE SOUZA RAMOS - Integrante / LUAN MORAIS DA SILVA - Integrante.

Dinâmica do CO₂ em ambientes ecotonais da Amazônia, Cerrado e Pantanal. Integrantes: Cleverson Ricardo Soares Viana - Integrante / Claumir Cesar Muniz - Integrante / OLIVEIRA JUNIOR, ERNANDES SOBREIRA - Coordenador / LÁZARO, WILKINSON LOPES - Integrante / Acisa Raimunda de Souza - Integrante / PEREIRA, THIAGO FERREIRA - Integrante / Beatriz Ferraz Buhler - Integrante / Josiane Santos Batista Carioca de Paula - Integrante / SOLANGE KIMIE IKEDA CASTRILLON - Integrante.

Projetos de extensão

Saúde Ambiental e Qualidade do Ar: Enfrentando os Efeitos dos Incêndios Florestais. Integrantes: Cleverson Ricardo Soares Viana - Integrante / Ernandes Sobreira Oliveira-Junior - Coordenador / Sanda Hacon - Integrante / Sofia Caumo - Integrante / Adriana Gioda - Integrante / Máisa Consuelo dos Santos Shimokawa - Integrante.

Pint of Science - Edição Cáceres. Integrantes: Cleverson Ricardo Soares Viana - Integrante / Claumir Cesar Muniz - Integrante / Ernandes Sobreira OLiveira-Junior - Integrante / Jonathan Anderson de Paula Caldas - Integrante / Milaine Fernandes dos Santos - Integrante / Wilkinson Lopes Lázaro - Integrante / Adriano Marcos Romano - Integrante / Amabilen de Oliveira Furlán - Integrante / Derick Victor de Souza Campos - Coordenador / DAIANE SOUZA MARTINS NIECZAY - Integrante / UIZ FERNANDO CALDEIRA RIBEIRO - Integrante / DANIELLE CEVALLOS SOARES - Integrante.

LIPAN no FIPE. Integrantes: Cleverson Ricardo Soares Viana - Integrante / ERNANDES SOBREIRA OLIVEIRA JUNIOR - Integrante / MUNIZ, CLAUMIR CESAR - Coordenador / PEREIRA, THIAGO FERREIRA - Integrante / Amabilen de Oliveira Furlán - Integrante / Derick Victor de Souza Campos - Integrante / Beatriz Ferraz Buhler - Integrante.

1º LIPAN na Praça. Integrantes: Cleverson Ricardo Soares Viana - Coordenador / Claumir Cesar Muniz - Integrante / Ernandes Sobreira OLiveira-Junior - Integrante / Jonathan Anderson de Paula Caldas - Integrante / Milaine Fernandes dos Santos - Integrante / Wilkinson Lopes Lázaro - Integrante / Máisa Consuelo dos Santos Shimokawa - Integrante / Amabilen de Oliveira Furlán - Integrante / Derick Victor de Souza Campos - Integrante / Beatriz Ferraz Buhler - Integrante / Eduardo Fagundes Mendes - Integrante / Tatiane Gomes de Almeida - Integrante.