



INTERAÇÃO ENTRE EXTREMOS CLIMÁTICOS E FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL AUMENTA A OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS NO PARÁ DURANTE O EL NIÑO DE 2023.

Ignácio Martins Pinho ¹; Breno Izidoro Domingos ¹; Bárbara Marie Van Sebroeck Lutiis Silveira Martins ¹; Felipe Ernesto Mesias Campos ¹ Fernanda Silva Clementino ¹; Tássio Koiti Igawa ¹; Alber Hamersson Sánchez Ipira ¹; Guilherme Augusto Verola Mataveli ¹; Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão ¹; Liana Oighenstein Anderson ².

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Avenida dos Astronautas, 1758, São José do Campos - SP, Brasil

martins.pinhos@gmail.com <https://orcid.org/0009-0007-0077-0047>

brenodomingos234@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6705-6998>

barbara.martins@inpe.br <https://orcid.org/0000-0002-7306-8116>

fe.em.campos@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-1993-532X>

fernanda.sclementino@gmail.com <https://orcid.org/0009-0000-2267-651X>

tassio.igawa@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-9974-0380>

alber.ipia@inpe.br <https://orcid.org/0000-0001-7966-2880>

guilhermemataveli@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-4645-0117>

luiz.aragao@inpe.br <https://orcid.org/0000-0002-4134-6708>

² Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), Parque tecnológico de São José dos Campos, Rua Doutor Altino Bondesan, 500, São José dos Campos - SP, Brasil.

lianaanderson@gmail.com <https://orcid.org/0001-9545-5136>

RESUMEN. La Amazonía es el bosque tropical más grande del mundo y su conservación es fundamental para regular el clima global. Sin embargo, enfrenta una considerable presión antropogénica que resulta en numerosos incendios forestales, causando degradación y retroalimentación. Las condiciones meteorológicas y la fragmentación del bosque influyen en la incidencia de los incendios. Durante años secos extremos, como en el evento de El Niño de 2023, el área quemada supera la media. Por lo tanto, este estudio examinó cómo la interacción entre la fragmentación forestal y los extremos de sequía y calor podría incrementar los incendios en Pará, focalizándose en el tercer trimestre de 2023. Se analizaron las diferencias en las áreas quemadas en lugares con y sin anomalías climáticas, considerando diferentes niveles de fragmentación. Los resultados señalaron una predominancia de incendios en áreas con anomalías, aunque muchas áreas afectadas por anomalías no registraron incendios. Se observó que los paisajes fragmentados son más vulnerables. Esto demuestra que los extremos climáticos intensifican los incendios de origen antropogénico. Es crucial establecer políticas para reducir la fragmentación y la degradación en la Amazonía.

Palabras-clave: Amazônia; incendios forestales; El Niño; fragmentación forestal; sequía.

RESUMO. A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo e sua conservação é essencial para a regulação do clima terrestre. Entretanto, a floresta sofre grande pressão antrópica, resultando em muitos incêndios florestais. Os incêndios causam degradação e geram um efeito de retroalimentação. As condições meteorológicas e a fragmentação da floresta influenciam a incidência de incêndios. Em anos de seca extrema a área queimada é maior que a média, como ocorreu durante o El Niño de 2023. Portanto, este trabalho analisou como a interação entre fragmentação florestal e extremos de seca e calor pode aumentar os incêndios no Pará, considerando o terceiro trimestre de 2023. Foram analisadas as diferenças na área queimada em localidades com e sem anomalias climáticas, considerando diferentes níveis de fragmentação. Os resultados indicaram predominância de incêndios em áreas com anomalias. Entretanto, muitas localidades com anomalias não registraram incêndios.



Constatou-se que paisagens fragmentadas são mais afetadas. Isso demonstra que extremos climáticos potencializam incêndios de origem antrópica. É necessária a criação de políticas para minimizar a fragmentação e reduzir a degradação da Amazônia.

Palavras-chave: Amazônia; incêndios florestais; El Niño; fragmentação florestal; seca.

ABSTRACT. The Amazon rainforest is the largest tropical forest in the world, and its conservation is crucial for regulating the Earth's climate. However, the forest faces significant anthropogenic pressure, resulting in numerous forest fires. These fires cause degradation and create a feedback effect. Weather conditions and forest fragmentation influence the incidence of fires. During extreme dry years, such as the 2023 El Niño event, the burned area exceeds the average. Therefore, this study examined how the interaction between forest fragmentation and extremes of drought and heat could increase fires in Pará, focusing on the third quarter of 2023. Differences in burned areas were analyzed in locations with and without climate anomalies, considering varying levels of fragmentation. The results indicated a predominance of fires in areas with anomalies; however, many anomaly-affected locations did not record fires. It was found that fragmented landscapes are more affected. This demonstrates that climatic extremes exacerbate anthropogenic fires. The creation of policies to minimize fragmentation and reduce Amazon degradation is essential.

Keywords: Amazon; forest fires; El Niño; fragmentation; drought.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo. A conservação deste bioma é fundamental para a manutenção de sua biodiversidade extremamente rica, regulação do clima, estoque de carbono e prestação de serviços ecossistêmicos. Além do valor intrínseco de uma floresta tão diversa, a Amazônia é essencial para a manutenção da qualidade e modo de vida das mais de 40 milhões de pessoas que habitam o bioma (Hech et al, 2021). A floresta amazônica também tem um importante papel para o resto do mundo dado que estoca entre 150 e 200 Pg de carbono que seriam liberados na atmosfera com sua degradação e desmatamento (IPCC, 2021). Este cenário não é improvável visto que o bioma tem sofrido grande pressão antrópica através do avanço do desmatamento, corte seletivo ilegal, extremos de secas e temperatura e grilagem de terras (Flores et al, 2024). Em conjunto com secas extremas que têm se tornado frequentes por conta do aquecimento global, a floresta tem experienciado muitos eventos de incêndios florestais (Aragão et al, 2018).

A degradação florestal decorrente dos incêndios causa diversos impactos no funcionamento do ecossistema. O fogo causa mortalidade das plantas, aumentando a carga de material combustível, libera gases de efeito estufa para a atmosfera, reduz a cobertura do dossel, o que aumenta a incidência da radiação solar no interior da floresta e reduz os estoques de biomassa (Lapola et al, 2023). Isso faz com que a floresta torne-se mais seca e quente e, portanto, mais suscetível à reocorrência de incêndios (Cochrane et al, 1999). Os incêndios florestais ainda causam impactos socioeconômicos como mortalidade direta de pessoas, aumento de doenças respiratórias, insegurança hídrica e alimentar, perda agrícolas, entre outros (Campanharo et al, 2019). As causas de incêndios na Amazônia são predominantemente antrópicas. O fogo é utilizado para dois fins: conversão de áreas de floresta em áreas agropecuárias e manutenção de áreas de pastagem de forma a evitar o crescimento de vegetação secundária (Barlow et al, 2020). Especialmente nos períodos mais secos, é comum que o fogo escape para áreas florestadas e resulte em incêndios florestais (Cano-Crespo et al, 2015).

Estão descritos na literatura diversos vetores de ocorrência de incêndios florestais na Amazônia. Entre eles estão as condições meteorológicas e a fragmentação da floresta. De acordo com Silva-Junior et al, 2022, a ocorrência de incêndios florestais cresce



exponencialmente a partir de limiares de baixa precipitação e altas temperaturas. Carvalho *et al.*, 2021, demonstrou que o fogo na Amazônia concentra-se em um período de até três meses que coincide com os meses de auge da seca, considerando que a época seca varia entre as diferentes regiões do bioma. Já a fragmentação resulta no surgimento de bordas entre floresta e áreas de uso antrópico. Essas áreas da floresta estão sujeitas ao efeito de borda e tem um microclima mais quente, seco, com mais vento e menor quantidade de biomassa. Essa combinação, junto com a proximidade das fontes de ignição que vêm das áreas de uso antrópico, torna as bordas das florestas mais inflamáveis (Silva-Junior *et al.*, 2018).

No ano de 2023, foi registrada uma redução do desmatamento na Amazônia brasileira. Entretanto, houve um aumento expressivo da quantidade de incêndios florestais em alguns estados da Amazônia. No Pará, houve um aumento de 327 % na quantidade de incêndios florestais, com um grande aumento na ocorrência de incêndios em florestas primárias (Mataveli *et al.*, 2024). O ano de 2023 foi marcado por um forte evento de El Niño que resultou em secas e temperaturas extremas na Amazônia (INMET, 2024). Historicamente, em anos de ocorrência de El Niño, a extensão de área queimada na Amazônia é excepcionalmente grande (Silva-Junior *et al.*, 2019). Embora se saiba que as anomalias climáticas em anos de El Niño resultam em uma maior área queimada na Amazônia, suas interações com a composição e configuração da paisagem não são claramente entendidas. Portanto, o objetivo deste trabalho foi analisar como a interação entre a fragmentação florestal e os extremos climáticos de seca e calor pode aumentar a ocorrência de incêndios florestais no estado do Pará durante o terceiro trimestre de 2023, que coincide com o período de ocorrência de fogo no estado (Carvalho *et al.*, 2021). Serão analisadas as diferenças entre a área de floresta queimada em localidades com e sem anomalias climáticas, considerando diferentes níveis de fragmentação na paisagem. Espera-se que as regiões com anomalias climáticas e altamente fragmentadas sejam as mais afetadas pelo fogo. Ao mesmo tempo, espera-se que localidades com anomalias mas com floresta íntegra tenham sido pouco afetadas. Do mesmo modo, espera-se que a ocorrência de incêndios em localidades sem anomalia climática seja menor, mas também dependente do nível de fragmentação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo.

A extensão do bioma amazônico no estado do Pará foi definida como a área de estudo deste trabalho. Com aproximadamente 1,245 milhões de Km², o Pará é o segundo maior estado da Amazônia Legal e é praticamente inteiro coberto pelo bioma amazônico, com exceção de ocorrência de Cerrado em uma pequena região no sudeste do estado. O Pará está na fronteira do desmatamento e apresentou a maior taxa de desmatamento (PRODES) e a maior quantidade de focos de calor (BDQueimadas) entre os estados da Amazônia Legal em 2023. A área de estudo foi dividida em uma grade regular de 10 Km x 10 Km.

2.2 Dados utilizados

2.2.1 Cobertura Florestal e Métricas de Paisagem

A cobertura florestal foi definida a partir dos dados da coleção 8.0 do Mapbiomas. Este projeto utiliza imagens da série Landsat, com 30 m de resolução espacial, para realizar mapeamentos anuais de uso e cobertura do solo no Brasil. Foram utilizados os dados



referentes ao ano de 2023. Partindo-se da máscara de floresta, foi calculado para cada uma das células da grade a área média dos fragmentos (AMF) de floresta como indicativo de fragmentação florestal. Para isso foi utilizado o pacote *LandscapeMetrics* (Hesselbarth *et al*, 2019) em R.

2.2.2 Área de Floresta Queimada

Os dados de área queimada foram obtidos do produto MCD64A1 (Giglio *et al*, 2021), derivado do sensor MODIS. O produto apresenta uma resolução espacial de 500 m e o sensor coleta dados diariamente. Foi utilizada a máscara de cobertura florestal para extrair apenas a área de floresta queimada no estado do Pará.

2.2.3 Anomalias de Temperatura de Superfície e de Déficit Hídrico.

A ocorrência de anomalia de temperatura de superfície foi calculada a partir de dados do produto MOD21A1D (Hulley, 2021), também derivado do sensor MODIS. Entretanto, a resolução espacial deste produto é de 1 Km. Foram utilizados dados desde o ano 2000, quando foi iniciada a operação do sensor.

Para avaliar as anomalias relacionadas à precipitação, foi utilizado o conceito de Déficit Hídrico Acumulado (Aragão *et al*, 2007). Considera-se que as florestas tropicais úmidas transpiram 100 mm/ m². mês e, portanto, quando a precipitação é inferior a este valor, a vegetação entra em déficit hídrico. A ocorrência de anomalia de Déficit Hídrico Acumulado foi calculada a partir de dados do produto CHIRPS (Funk *et al*, 2015), que apresenta uma resolução espacial de 0,05 °. Foram utilizados dados desde o ano 2000 para compatibilizar com a série histórica de dados de temperatura de superfície.

As ocorrências de anomalias foram calculadas utilizando o *z-score* (Anderson *et al*, 2010). Os dados do período de análise, terceiro trimestre de 2023, foram subtraídos da média da série temporal (2000 - 2023) e divididos pelo desvio padrão. A ocorrência de anomalias de temperatura foi definida utilizando o limiar de $z\text{-score} > 1,96$. Este limiar indica que as temperaturas registradas estão mais de um desvio padrão acima da média da série temporal. Já a ocorrência de anomalias de déficit hídrico foi definida com o limiar de $z\text{-score} < -1,96$, indicando déficit mais de um desvio padrão acima da média. O cálculo foi feito a partir da seguinte equação:

$$Zi = (Xi - \mu) \div \sigma \quad (1)$$

Onde: Zi = *z-score* da variável de interesse; Xi = dado referente ao terceiro trimestre de 2023; μ = média da série temporal; σ = desvio padrão da série temporal.

Para o cálculo da média e desvio padrão, foram desconsiderados anos de seca excepcional (2005, 2010, 2015 e 2016). Sem isso, a ocorrência de anomalias seria subestimada, pois o cálculo da média e desvio padrão seria afetado por valores extremos que ocorreram nesses anos. Neste trabalho, foi considerada uma anomalia dupla quando havia ocorrência de anomalia de temperatura e de déficit hídrico em uma mesma célula.

2.3 Análise dos Dados



Inicialmente, foram feitas análises exploratórias dos dados. Foi levantada a quantidade de células com ocorrência de incêndios florestais para estas quatro classes de anomalia climática: sem anomalia, anomalia apenas para temperatura de superfície, anomalia apenas para o déficit hídrico e anomalia dupla. Em seguida, foi calculada a área total de floresta queimada em cada uma dessas classes. Também foi produzido um mapa indicando a ocorrência de anomalia e de incêndios florestais para que a distribuição espacial desses eventos pudesse ser observada.

Antes de passar para análises mais detalhadas, foi calculada a proporção entre área de floresta queimada e área total de floresta para cada célula. Isso foi realizado para evitar o viés de análise de que células com mais florestas tenham maior área de floresta queimada simplesmente por terem mais floresta para ser queimada. Em seguida, foram feitos *boxplots* para analisar as distribuições e diferenças entre as proporções de floresta queimada para as células de cada uma das classes de anomalia. As células também foram divididas em quatro classes a partir dos quantis da métrica de área média dos fragmentos de floresta. Para estes grupos, também foram feitos *boxplots*. Por fim, considerando as categorias de anomalia e os quantis de AMF, foi feito um *boxplot* para analisar a interação entre os efeitos da fragmentação e das anomalias climáticas. Em todos os casos, foram realizados testes ANOVA para avaliar se há diferença significativa entre a proporção de floresta queimada para cada grupo. Nos casos em que foi constatada diferença significativa, foram realizados testes de Tukey para avaliar quais grupos são diferentes entre si. Para estes boxplots e teste estatísticos foram consideradas apenas as células que tiveram ocorrência de incêndios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As primeiras análises indicam uma prevalência da ocorrência de incêndios florestais em paisagens com anomalias climáticas (Tabela 1). Entre as 653 células com ocorrência de incêndios florestais, apenas 22 não tiveram ocorrência de anomalia climática. Nessas células, foi queimada uma área de floresta de apenas 5.99 Km² dentro de um total de 483.27 Km².

Total de células com ocorrência de incêndio florestal e área queimada por classe de anomalia

Classe de anomalia	Total de células	Área de floresta queimada (Km ²)
Anomalia Dupla	359	307.28 (0.033)
Anomalia de Déficit Hídrico	66	19.04 (0.002)
Anomalia de Temperatura	206	151.06 (0.016)
Sem anomalia	22	5.99 (0.0006)
Total	653	483.27 (0.052)

Tabela 1. Total de células com ocorrência de incêndio florestal e área de floresta queimada por classe de anomalia. Entre parênteses estão as porcentagens de área de floresta queimada em relação à área total de floresta no Pará.

Apesar de estes resultados indicarem uma forte relação entre anomalias climáticas e ocorrência de incêndios florestais, é preciso analisar a distribuição espacial desses dados no mapa de ocorrência de incêndios e anomalias climáticas (Figura 1). O mapa indica que predomina a ocorrência de incêndios em células com anomalias climáticas. Ao analisar o



mapa também pode-se observar que todas as células sem anomalias que registraram incêndios são adjacentes a células com algum tipo de anomalia. Entretanto, também são observadas inúmeras células com anomalia sem ocorrência de incêndio. Grande parte das paisagens com incêndios estão localizadas em áreas com forte atividade antrópica, como desmatamento e agropecuária. Isso indica que as condições de seca e alta temperatura resultantes da ocorrência de anomalias climáticas não são a causa primária dos incêndios, mas atuam como potencializadores de sua ocorrência.

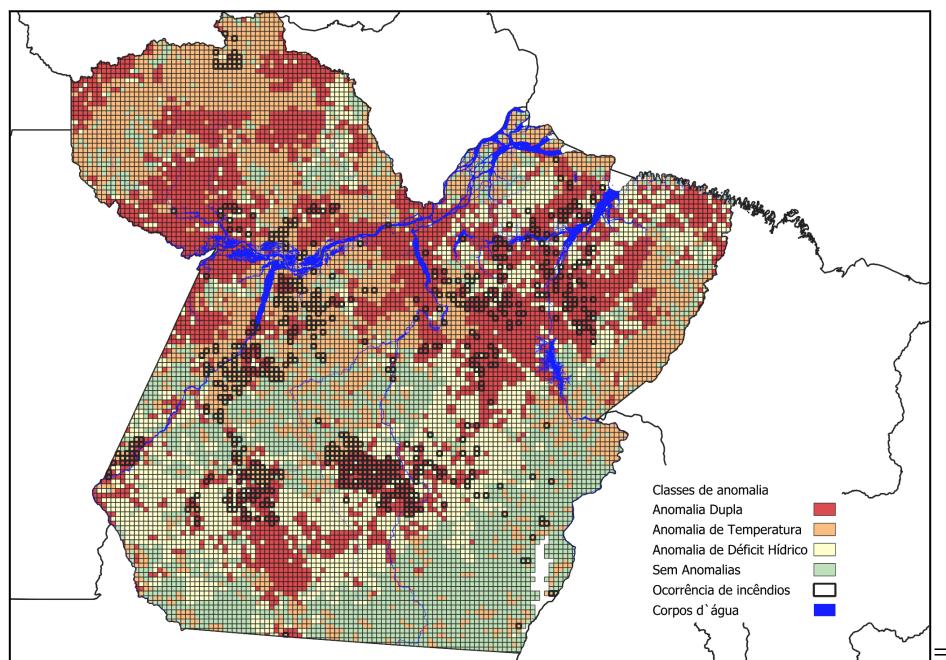


Figura 1. Mapa da ocorrência das quatro classes de anomalias climáticas e de incêndios florestais no Pará.

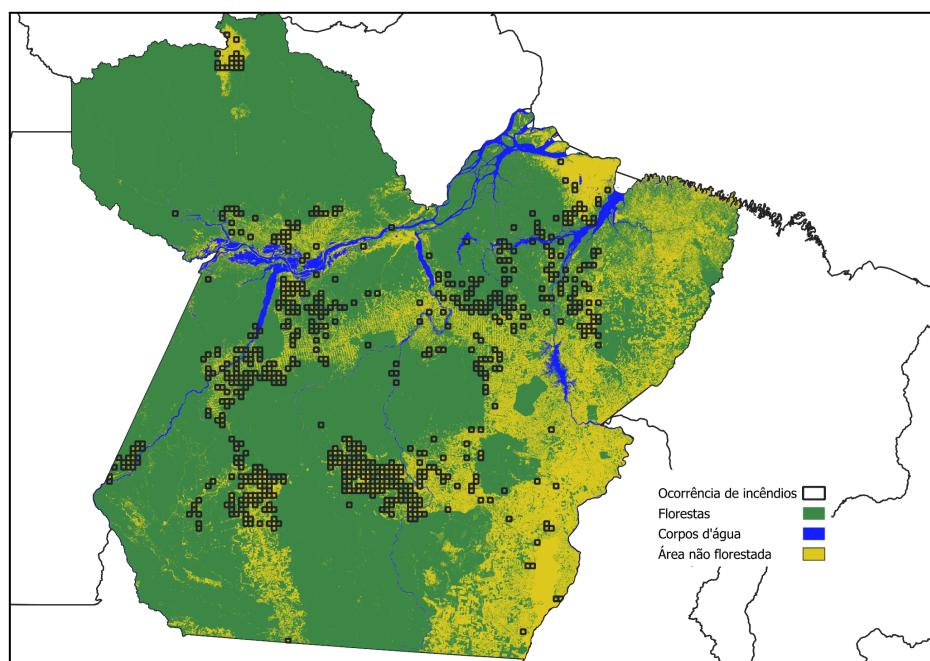


Figura 2. Mapa da cobertura florestal no Pará e da ocorrência de incêndios florestais no Pará.



Embora exista uma enorme diferença entre a quantidade de incêndios florestais ocorridos em células com anomalias e sem anomalias, não foi verificada uma diferença significativa, a partir do teste ANOVA, entre a proporção de área de floresta queimada entre as quatro classes de anomalia (Figura 3). Isso indica que apesar de ser mais difícil para um incêndio ocorrer em paisagens sem anomalia, os impactos do incêndio sobre estas células têm proporções similares aos impactos ocorridos em células com anomalias.

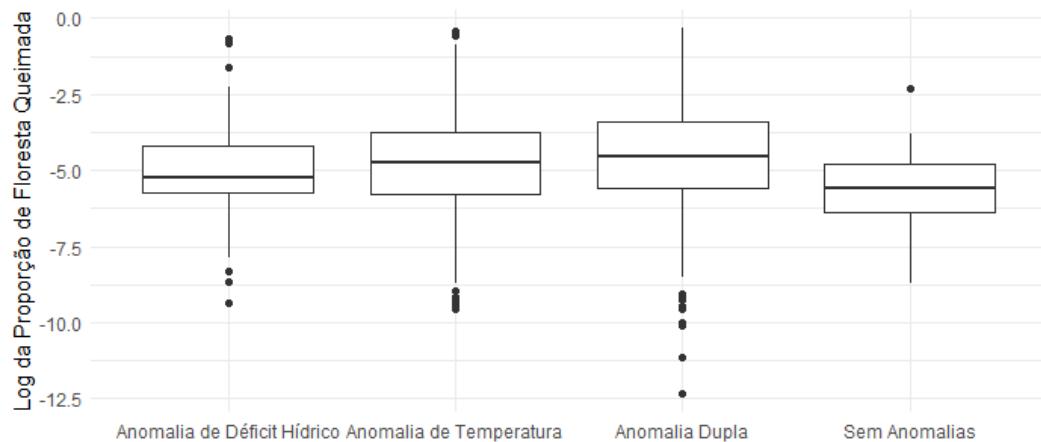


Figura 3. Boxplots da proporções de floresta queimada para cada classe de anomalia climática em escala logarítmica. ANOVA p-valor: 0.462

Ao analisar as diferenças entre as proporções de floresta queimada entre os quantis de área média dos fragmentos de floresta, foi observada, a partir dos testes ANOVA e Tukey, uma diferença significativa entre o primeiro quantil e os outros três. O primeiro quantil é composto pelas células com paisagem mais transformada, desmatada e fragmentada. Foram estas células que se mostraram mais impactadas pelos incêndios florestais. Isso é explicado pelas consequências dos efeitos de borda. As bordas das florestas são mais secas, quentes, têm menos biomassa e estão mais próximas das fontes de ignição antrópicas. Todas essas características tornam as bordas mais suscetíveis à ocorrência do fogo. Portanto, esse resultado era esperado.

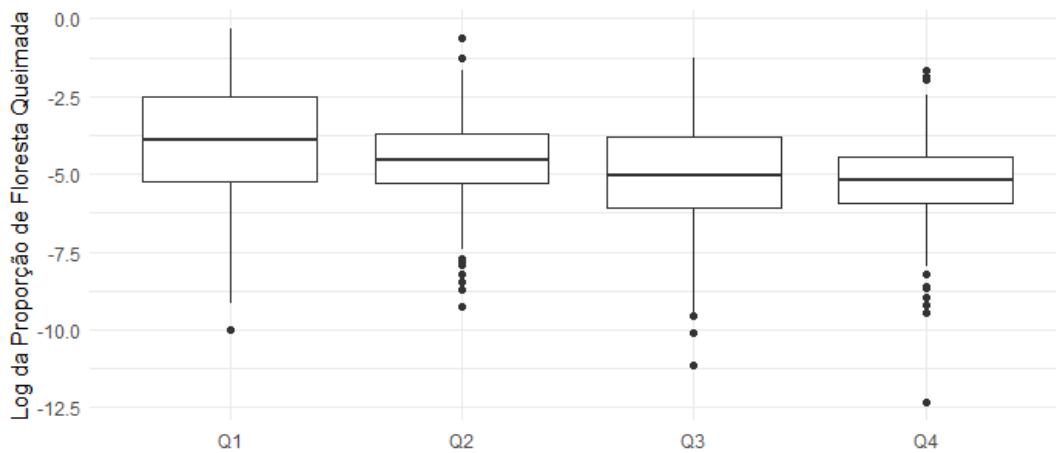


Figura 4. Boxplots das proporções de floresta queimada para cada quantil de área média dos fragmentos de floresta. Q1 indica o primeiro quantil, que engloba as células com os menores fragmentos. Do outro lado, Q4 engloba as células com os maiores fragmentos. ANOVA p-valor: 8.57 e-13; Tukey p-valor < 0.05 para Q1 - Q4; Q1- Q3; Q1 - Q2.



Por fim, foi analisado se existiam diferenças entre as proporções de floresta queimada para cada classe de anomalia dentro de cada um dos quantis de área média dos fragmentos de floresta (Figura 4). Novamente percebe-se uma maior proporção de floresta queimada no primeiro quartil. Entretanto, a partir de testes ANOVA, não foram observadas diferenças significativas entre as classes de anomalia para cada um dos quantis.

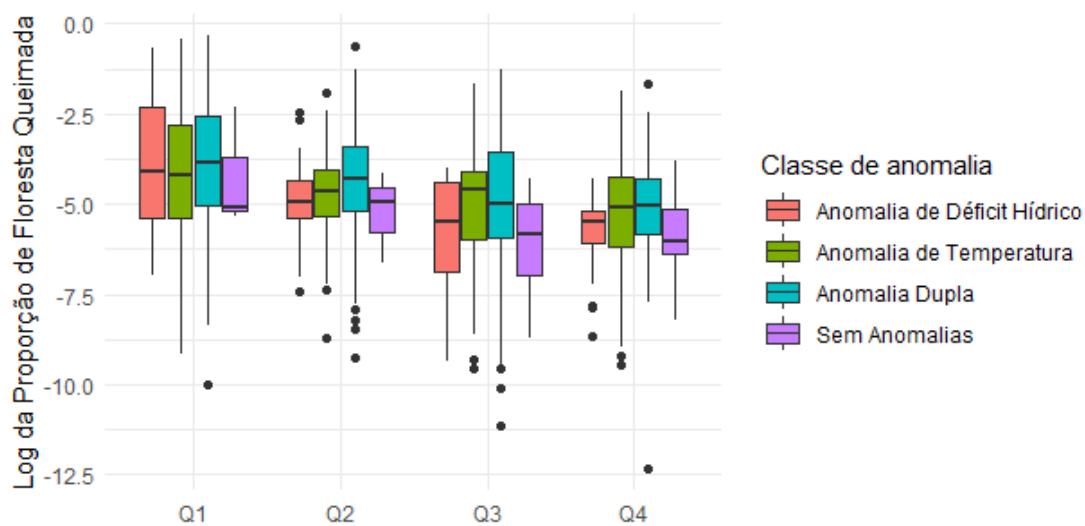


Figura 5. Boxplots das proporções de floresta queimada para cada classe de anomalia dentro dos quatro quartis de área média dos fragmentos de floresta. Q1 indica o primeiro quartil, que engloba as células com os menores fragmentos. Do outro lado, Q4 engloba as células com os maiores fragmentos. ANOVA p-valor >0.05 para todos os grupos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho indicam uma sinergia entre os extremos climáticos que ocorreram durante o El Niño de 2023 e a fragmentação florestal para aumentar a ocorrência de incêndios florestais no estado do Pará. Estes resultados são importantes para demonstrar que os extremos climáticos por si só não explicam os incêndios observados, mas atuam como potencializadores de incêndios originados a partir de atividades antrópicas. Pode ser concluído que a fragmentação é um vetor chave para ocorrência de incêndios florestais posto que torna as bordas das florestas mais inflamáveis. Embora o Brasil tenha planos e políticas que visam reduzir o desmatamento, o que reduz também a fragmentação, são necessárias políticas que minimizem a fragmentação florestal da Amazônia a partir da óptica de reduzir a degradação causada por incêndios florestais. Dado o caráter de retroalimentação dos incêndios, a criação de tais políticas é essencial para a manutenção da biodiversidade, dos serviços ecossistêmicos e das populações amazônicas.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, L. O. et al. **Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies.** New Phytologist, v. 187, p. 733-750, 2010. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x.



ARAGÃO, L. E. O. C., MALHI, Y. ROMAN-CUESTA, R. M. SAATCHI, S., ANDERSON, L. O., SHIMABUKURO, Y. E.. **Spatial patterns and fire response of recent amazonian droughts.** Geophysical Research Letters, 34(7), 2007. DOI: 10.1029/2006GL028946

ARAGÃO, L. E. O. C. et al., **21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions.** Nat. Commun. 9, 1–12, 2018. DOI: 10.1038/s41467-017-02771-y

BARLOW, J. et al. **Clarifying Amazonia's burning crisis.** Global Change Biology. 26, 319–321, 2020. DOI: 10.1111/gcb.14872

BDQueimadas. **Programa Queimadas do INPE.** Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>. Acesso em: 27/06/2024.

CAMPANHARO, W. A., LOPES, A. P., ANDERSON, L. O., DA SILVA, T. F. M. R. & ARAGÃO, L. E. O. C. **Translating fire impacts in Southwestern Amazonia into economic costs.** Remote Sens. 11, 2019. DOI: 10.3390/rs11070764

CANO-CRESPO, A., OLIVEIRA, P. J. C., BOIT, A., CARDOSO, M. & THONICKE, K. **Forest edge burning in the Brazilian Amazon promoted by escaping fires from managed pastures.** J. Geophys. Res. Biogeosciences 120, 2095–2107, 2015. DOI: 10.1002/2015JG002914

CARVALHO, N. S. et al., **Spatio-temporal variation in dry season determines the Amazonian fire calendar.** Environ. Res. Lett. 16, 2021. DOI: 10.1088/1748-9326/ac3aa3

COCHRANE, M. A. et al., **Positive Feedbacks in the Fire Dynamic of Closed Canopy Tropical Forests.** Science. 284, 1832–1835, 1999. DOI: 10.1126/science.284.5421.1832

FLORES, B. M. et al., **Critical transitions in the Amazon forest system.** Nature 626, 555–564, 2024. DOI: 10.1038/s41586-023-06970-0

FUNK, C. et al. **The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes.** Scientific data, 2(1):1–21, 2015 DOI: 10.1038/sdata.2015.66

GIGLIO, L. et al (2021). **MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V061** [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. DOI: [10.5067/MODIS/MCD64A1.061](https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.061)

HECHT, S. et al., Chapter 14: The Amazon in Motion: Changing Politics, Development Strategies, Peoples, Landscapes, and Livelihoods. em: NOBRE C. et al., (Eds). **Amazon Assessment Report**, 2021. United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. Disponível em: <https://www.theamazonwewant.org/spa-reports/>

Hulley, G., S. H. **MODIS/Terra Land Surface Temperature/3-Band Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid Day V061.** 2021, NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, DOI: 10.5067/MODIS/MOD21A1D.061.



IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis (eds Masson-Delmotte, V. et al.,) <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>. Cambridge Univ. Press, 2021.

INMET. El Niño: saiba como foi a atuação do fenômeno no Brasil. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/el-ni%C3%B1o-saiba-como-foi-a-atua%C3%A7%C3%A3o-do-fen%C3%BDmeno-no-brasil#:~:text=Sobre%20o%20El%20Ni%C3%B1o&text=O%20fen%C3%BDmeno%20n%C3%A3o%20tem%20um,cheagasse%20a%20sua%20maior%20intensidade>. Acesso em: 26/06/2024.

HESSELBARTH, M. H. et al. Landscapemetrics: an open-source R tool to calculate landscape metrics. *Ecography*, **42**, 1648-1657, 2019. (v2.1.3)

LAPOLA, D. M. et al., The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science* (80-.). 349, 2023. DOI: 10.1126/science.abp8622

MAPBIOMAS – Coleção 8.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>

MATATVELI, G. et al, Deforestation falls but rise of wildfires continues degrading Brazilian Amazon forests. *Glob Change Biol*, 30: e17202. 2024. DOI: [10.1111/gcb.17202](https://doi.org/10.1111/gcb.17202)

PRODES. Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite. INPE. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

SILVA-JUNIOR, C. H. L. et al., Deforestation-Induced Fragmentation Increases Forest Fire Occurrence in Central Brazilian Amazonia. *Forests* 9, (2018). DOI: [10.3390/f9060305](https://doi.org/10.3390/f9060305)

SILVA-JUNIOR, C. H. L. et al. Fire responses to the 2010 and 2015/2016 Amazonian droughts. *Front. Earth Sci.* 7, 1–16, 2019. DOI: [10.3389/feart.2019.00097](https://doi.org/10.3389/feart.2019.00097)

SILVA-JUNIOR, C. H. L. et al., Forest Fragmentation and Fires in the Eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil. *Fire* 5, 1–17 (2022). DOI: [10.3390/fire5030077](https://doi.org/10.3390/fire5030077)