



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Deforestation, Wildfires, and Extreme Droughts in the Caatinga Biome, Brazil.

Iara Regina Ferreira do Carmo¹, Phelipe Silva de Araújo¹, Admo Ramos Silva Júnior¹,
Celso Henrique Leite Silva Junior^{3,1}

Corresponding author: ¹Graduate Program in Biodiversity and Conservation (PPGBC) – Federal University of Maranhão (UFMA), Bacanga University Campus. Avenida dos Portugueses, s/n. ZIP code: 65.085-580. São Luís – MA, email: igeoufma@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6713-5271>; admorsjr@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1928-0236>; phe1394@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0596-6771>; ³Amazon Environmental Research Institute (IPAM), SCLN 211 BLOCK B. ROOM 201. Brasília-DF, ZIP Code 70834-520 Email: celsohlsj@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1052-5551>.

Article received on 10/01/2024 and accepted on 02/17/2025

ABSTRACT

Given the increase in wildfires and the associated impacts of this phenomenon, it is essential to understand the factors contributing to their intensification, such as deforestation and climatic events, to grasp the dynamics that exacerbate them. In this context, the objective of this study was to analyze the influence of deforestation and climate change on the dynamics of wildfires in the Caatinga biome, as well as to assess their impacts on different types of vegetation. To achieve these objectives, a spatiotemporal analysis was conducted from 1990 to 2022, using remote sensing data from platforms such as MapBiomas and INMET. The results indicated that the Caatinga biome lost 153,761.35 km² due to deforestation, with the Caatinga Sensus Stricto being the most affected vegetation type. During the same period, 149,535.02 km² were affected by wildfires, with the Savanna Formation accounting for 80% of the burned area. Additionally, the analysis revealed a strong relationship between wildfires and factors such as climatic events and ecosystem fragmentation. These findings underscore the urgency of implementing public policies aimed at mitigating these impacts, conserving biodiversity, and reducing greenhouse gas emissions in the region.

Keywords: Increase in Climate Temperature. El Niño. Greenhouse Gases. Brazilian Biome.

Desmatamento, Incêndios Florestais e Secas Extremas no Bioma Caatinga, Brasil

RESUMO

Diante do aumento dos incêndios florestais e dos impactos associados a esse fenômeno, é essencial compreender os fatores que contribuem para essa intensificação, como o desmatamento e os eventos climáticos, a fim de entender a dinâmica que os agrava. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência do desmatamento e das mudanças climáticas na dinâmica dos incêndios florestais no bioma Caatinga, além de avaliar os impactos desses incêndios sobre diferentes tipos de vegetação. Para alcançar esses objetivos, foi realizada uma análise espaço-temporal de 1990 a 2022, utilizando dados de sensoriamento remoto provenientes de plataformas como MapBiomas e INMET. Os resultados indicaram que, o bioma Caatinga perdeu 153.761,35 km² devido ao desmatamento, com a Caatinga Sensus Stricto sendo a vegetação mais afetada. No mesmo período, 149.535,02 km² foram atingidos por incêndios, com a Formação Savânica representando 80% dessa área queimada. Além disso, a análise revelou uma forte relação entre os incêndios florestais e fatores como eventos climáticos e a fragmentação desses ecossistemas. Esses resultados, ressaltam a urgência de implementar políticas públicas voltadas para a mitigação desses impactos, a conservação da biodiversidade e a redução das emissões de gases de efeito estufa na região.

Palavras-chave: Aumento de Temperatura Climática. El Niño. Gases de Efeito estufa. Bioma brasileiro.

Introdução

O aumento do aquecimento global está refletido no incremento de 1,4°C na temperatura média terrestre desde 1980 (OMM, 2023), principalmente devido à emissão antropogênica dos gases de efeito estufa para a atmosfera, sendo que grande parte da emissão desses gases, foi derivada da mudança de uso da terra. Sendo que, a cada 1000 Gt (Gigatoneladas) de CO₂ (dióxido de carbono) emitidos pela atividade humana, estima-se um crescimento de até 0,63°C na temperatura climática.

Somente no Brasil, no ano de 2019, foram emitidos 69 Gt CO₂-eq, e as mudanças de uso e cobertura da terra foram responsáveis pela metade dessas emissões (IPCC, 2023). Sendo que, na área estudada, essa conversão de uso foi responsável pela emissão de mais de 300 milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera entre 1985 e 2009 (Rocha et al., 2024).

O Brasil possui uma área de 8,5 milhões de km², dos quais 59% são florestas, o equivalente a 5.015.000 km², o que o torna o segundo país com maior território florestal do mundo (Chen et al., 2024). Sendo dividido em seis biomas distintos: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa, Pantanal e Caatinga, todos com grandes índices de biodiversidade e endemismo (Maia et al., 2020; Chen et al., 2024; Barbosa et al., 2024).

Durante a COP 26, o Brasil se comprometeu a atingir o marco de desmatamento zero até 2028; porém, em 2021, essas taxas elevaram-se em 237%, somente na Amazônia legal, devido à mudança no Código Florestal Brasileiro, que facilita a retirada da vegetação remanescente para o setor agrícola (Matavelli et al., 2022). Segundo os dados do Mapbiomas (2023), o país já perdeu aproximadamente 33% de sua vegetação nativa. Sendo que, de 2019 a 2023, essa remoção foi de 85.582,58 km² (1,01%) (RAD, 2024).

Nesse contexto, os ambientes áridos merecem atenção, uma vez que, são áreas de fácil conversão para esse setor, ocupam aproximadamente 41,3% da superfície terrestre e abrigam 2 bilhões de pessoas, das quais uma parte substancial da população, dependem dos recursos naturais dessas áreas para sua subsistência, sobretudo, as comunidades tradicionais (Rocha et al., 2024).

Apesar desses ambientes serem ricos em biodiversidade e terem grande importância ecológica e econômica para a manutenção da vida no planeta, são altamente negligenciados e com

isso enfrentam grandes problemas ambientais e sociais (Rocha et al., 2024). Na América do Sul, esses locais representam 8,7% da área total, o que equivale a 5.450.000 km² (Rocha et al., 2024). No Brasil, 76% desses ambientes estão no bioma bioma Caatinga (Oliveira et al., 2023), e compõem 38% do território brasileiro (Barbosa, 2024).

Esses locais, são caracterizados pela extrema escassez hídrica e pela alta taxa de evapotranspiração, além de serem amplamente ignorados pelos poderes públicos e esquecidos pela comunidade científica (Rocha et al., 2024), o que impossibilita o desenvolvimento de medidas eficazes para a conservação e manejo ambiental (Oliveira et al., 2022; Rocha et al., 2024). Por esse motivo, tendem a ser mais afetados pelas ações antrópicas, tendo em vista que a proteção e fiscalização dessas regiões são irrisórias, considerando o tamanho do território.

A Caatinga possui uma área aproximada de 862.818 km², o que representa 10,1% de todo o território nacional (Brasil, 2024) e 70% da região Nordeste (Jardim et al., 2022), e alberga 13,29% da população brasileira. Onde, a maioria desses habitantes vive na linha da pobreza e dependem dos recursos naturais do bioma para sua subsistência (Brasil, 2024; Rocha et al., 2024).

Aproximadamente 57,9% da extensão desse território são áreas florestais, e mais de 41% da cobertura original já foi removida, com 22% desse desmatamento destinado ao setor agropecuário (MAPBIOMAS, 2023). Sendo considerado o terceiro bioma brasileiro mais modificado, ficando atrás apenas da Mata Atlântica e do Cerrado (Rocha et al., 2024).

O desmatamento é um processo que origina inúmeros impactos, dentre eles o aumento dos incêndios florestais, tendo em vista que, a retirada exacerbada da vegetação resulta em fragmentação de habitats e com isso a formação de bordas tornando-os mais suscetíveis a esses eventos apresentando uma taxa de incidência em até 84% nas áreas fragmentadas (Matavelli et al., 2023). Ademais, os elevados índices de desmatamento, combinados com as condições físicas da paisagem, tornam a Caatinga um dos biomas mais vulneráveis às mudanças climáticas do país (Oliveira et al., 202; Rocha et al., 2024).

Os incêndios florestais, sejam de origem natural ou antrópica, são perturbações intensificadas pelos atributos da paisagem, capazes de gerar uma série de impactos significativos na área afetada. Entre esses impactos, destacam-se a

perda de biodiversidade, a modificação da paisagem e o aumento das emissões de gases de efeito estufa (Silva-Júnior et al., 2022; Mataveli et al., 2023; Matachi-Loza et al., 2024).

Desde os anos 2000, as ocorrências desses eventos acarretaram, em cenário global, a perda de moradia de 119.911 pessoas, além de 14.454 feridos e 2.052 óbitos. Além disso, esses eventos impactaram mais de 30% dos ecossistemas naturais, resultando na perda de espécies únicas, incluindo mais de 3 bilhões de vertebrados, divididos em 143 milhões de mamíferos, 2,46 bilhões de répteis, 181 milhões de aves e 51 milhões de anfíbios (Haque et al., 2023; Matachi-Loza et al., 2024). Além de gerar um prejuízo anual de bilhões de reais aos cofres públicos (Brasil, 2024) e um dano inquantificável para a riqueza biológica.

As ocorrências de incêndios florestais tendem a ser intensificadas com o aumento das temperaturas climáticas (OMM, 2023). Atualmente, entre 30 e 46 milhões de km² são queimados anualmente (Haque et al., 2023). No Brasil, aproximadamente 19% do território já foi impactado pelo fogo (Marques et al., 2024). Durante os eventos de El Niño, a incidência desses episódios podem aumentar a incidência em 87% (Matavelli et al., 2023) e atingirem uma área 240% acima da média, quando comparados com os anos sem a presença do evento (Medeiros et al., 2024).

A dinâmica climática da Caatinga a torna sensível à degradação ambiental, principalmente em longos períodos de seca, pois, dentre outras coisas, expõe o solo ao risco de desertificação, sendo que 62% desse processo existente no Brasil, ocorre nesse bioma (Rodrigues et al., 2020). Além disso, esse ambiente possui condições propícias para o alastramento desse impacto, tendo em vista que apresenta altas temperaturas, baixa pluviosidade e precipitação (H. Araújo et al., 2023; Teixeira et al., 2023), podendo ficar de 7 a 10 meses sem a ocorrência de chuvas em algumas áreas (Sampaio et al., 2024).

Acrescenta-se a isso que a maioria dos solos possui caráter pedregoso, o que dificulta a infiltração da água nos aquíferos, facilitando o escoamento superficial e, com isso, a retirada de nutrientes do solo, o que favorece a formação de processos erosivos, o aumento das emissões de CO₂ e a perda de biodiversidade (Schuchmann et al., 2024).

Ademais, as características vegetacionais se somam às demais características físicas e intensificam a combustão das queimadas. Aproximadamente 90% da vegetação desse ecossistema é caracterizada como herbácea ou

arbustiva (Ribeiro et al., 2021), composta por xerófitas, cactos e arbustos espinhosos (Fernando et al., 2022; L. Araújo et al., 2023) e apresenta grande variação espacial. Essa variabilidade física contribui significativamente para a diversidade local, que possui uma taxa elevada de endemismo (H. Araújo et al., 2023).

A fragmentação florestal resultante de processos antrópicos reduz de maneira excessiva o número de espécies, modifica os ciclos biogeoquímicos e aumenta a vulnerabilidade das áreas remanescentes, tornando-as mais suscetíveis à degradação ambiental (Dutra et al., 2023; Matavelli et al., 2023; Pêsoa et al., 2023). A degradação leva à redução de AGB em até 58% em florestas primárias (Leão et al., 2024), dificulta a regeneração da área degradada (Lapola et al., 2023) e aumenta as emissões de gases de efeito estufa, já que a degradação contribui com 37% (2,7 Pg) das emissões (Silva-Junior et al., 2023).

Para isso, foi realizada uma análise minuciosa da dinâmica espaço-temporal dos incêndios florestais no bioma Caatinga, levando em consideração fatores climáticos e antrópicos, com o uso do sensoriamento remoto. Essa ferramenta tem se mostrado de grande valia para esse tipo de monitoramento, devido à sua eficácia em mapear a dinâmica do fogo em áreas remotas (Matavelli et al., 2023) e ao seu baixo custo financeiro (Georgiev, 2023).

Além disso, essa tecnologia permite a captura de dados em tempo real, utilizando sensores ópticos e térmicos, o que facilita a identificação precisa das áreas impactadas, além de acompanhar a evolução dos focos de incêndio (Georgiev, 2023). Adicionalmente, essa metodologia permite a análise de séries temporais, ajudando a entender padrões de ocorrência e a relação entre fatores climáticos e antrópicos com a propagação do fogo (Leão et al., 2024).

Portanto, o uso dessa técnica é de extrema importância para fornecer insights que auxiliem na prevenção desses eventos, além de mensurar os impactos causados por esse fenômeno e, assim, formular estratégias de prevenção dos incêndios florestais. Isso contribui significativamente para a conservação dos ecossistemas e a redução dos impactos ambientais e socioeconômicos causados por estes eventos (Abramov et al., 2024; Sharma et al., 2023). Além disso, gera dados que possibilitam a criação de leis para esse bioma tão biodiverso e negligenciado, onde apenas 8% possui leis de proteção ambiental (Jardim et al., 2022; Rocha et al., 2024) e apenas 1% conta com proteção total (Rocha et al., 2024).

Tendo em vista a imensurável importância ecológica e econômica do bioma Caatinga em escala global (MMA, 2024), a hipótese deste trabalho foi que as altas taxas de desmatamento, assim como os eventos climáticos no bioma Caatinga, intensificam a incidência e a propagação dos incêndios florestais, resultando em uma perda considerável de biodiversidade e na redução da capacidade do bioma de atuar como sumidouro de carbono. Portanto, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência do desmatamento e das mudanças climáticas na dinâmica dos incêndios florestais no bioma Caatinga.

Materiais e métodos

Área de estudo

O bioma Caatinga localiza-se principalmente na região do Nordeste brasileiro, abrangendo os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande

do Norte, Paraíba, Sergipe, Bahia, Alagoas, Pernambuco, Maranhão e o Norte de Minas (Figura 1) (Brasil, 2024). Suas coordenadas geográficas variam entre 3° a 17° de latitude Sul e 35° a 45° de longitude Oeste (IBGE, 2022), ocupando uma área de 862.639 km², dos quais 57% são compostos por áreas florestais (MAPBIOMAS, 2023). A classe de solos do bioma, em sua maioria, é composta por Latossolos, Planossolos e Neossolos (Embrapa, 2020).

Os climas predominantes, classificados de acordo com a classificação de Köppen, são Clima Semiárido Quente (BSh) e Tropical Quente e Úmido (As) (Alvares et al., 2013; H. Araújo et al., 2023), com temperaturas variando entre 24° e 26°C (L. Araújo et al., 2023) e com baixa precipitação, destacando-se como o bioma com o menor índice pluviométrico do país (Chen et al., 2024).

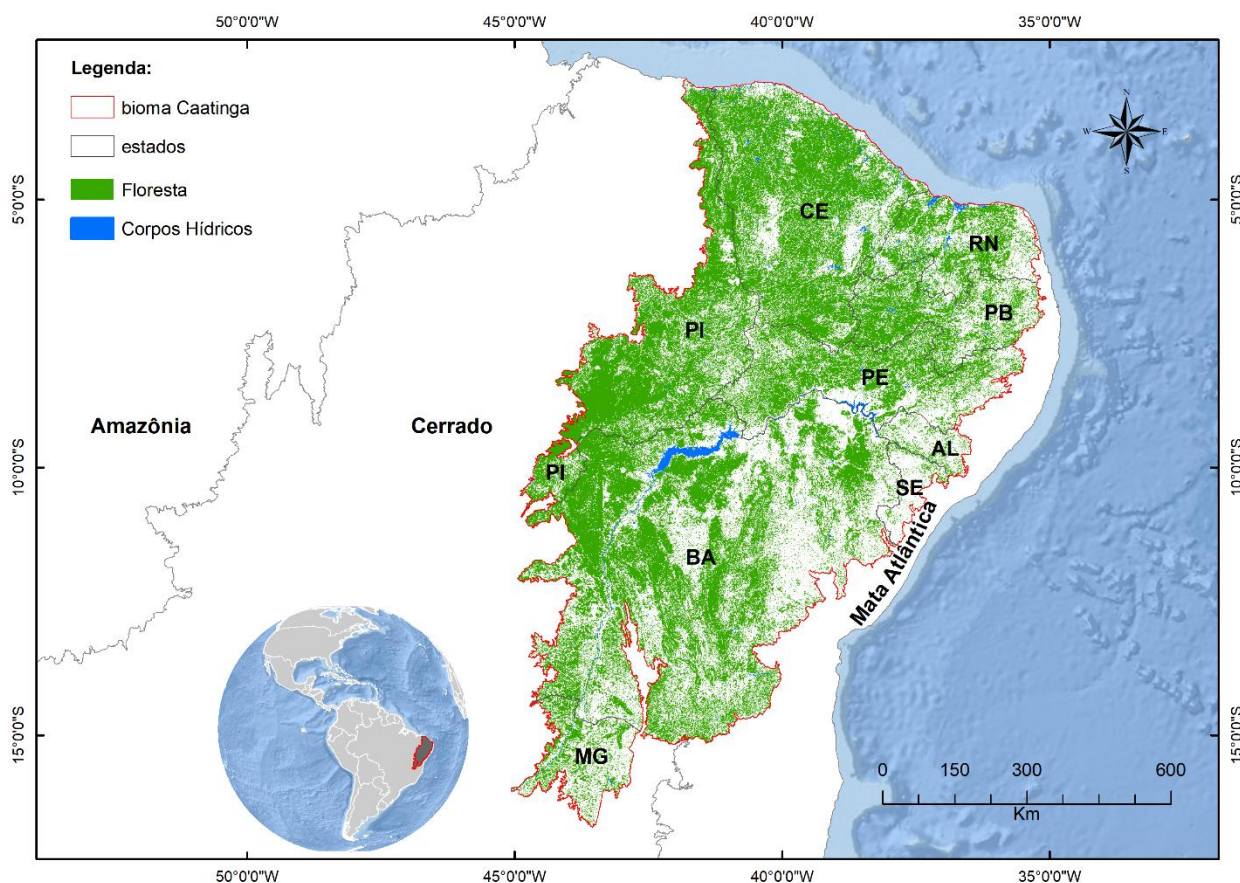


Figura 1. Mapa de Localização do bioma Caatinga Brasil.

Dados de Desmatamento

Para o desmatamento, os dados foram obtidos na plataforma MapBiomas que utiliza imagens de satélites Planet Scope, com uma resolução espacial de 3,7 metros. Para a validação, são empregados

dados do Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD), que é treinado com amostras de cada bioma

analisado e, em seguida, cruzado com informações do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e outras bases

de dados confiáveis (MAPBIOMAS, 2022) conforme ilustrado da Figura 02.

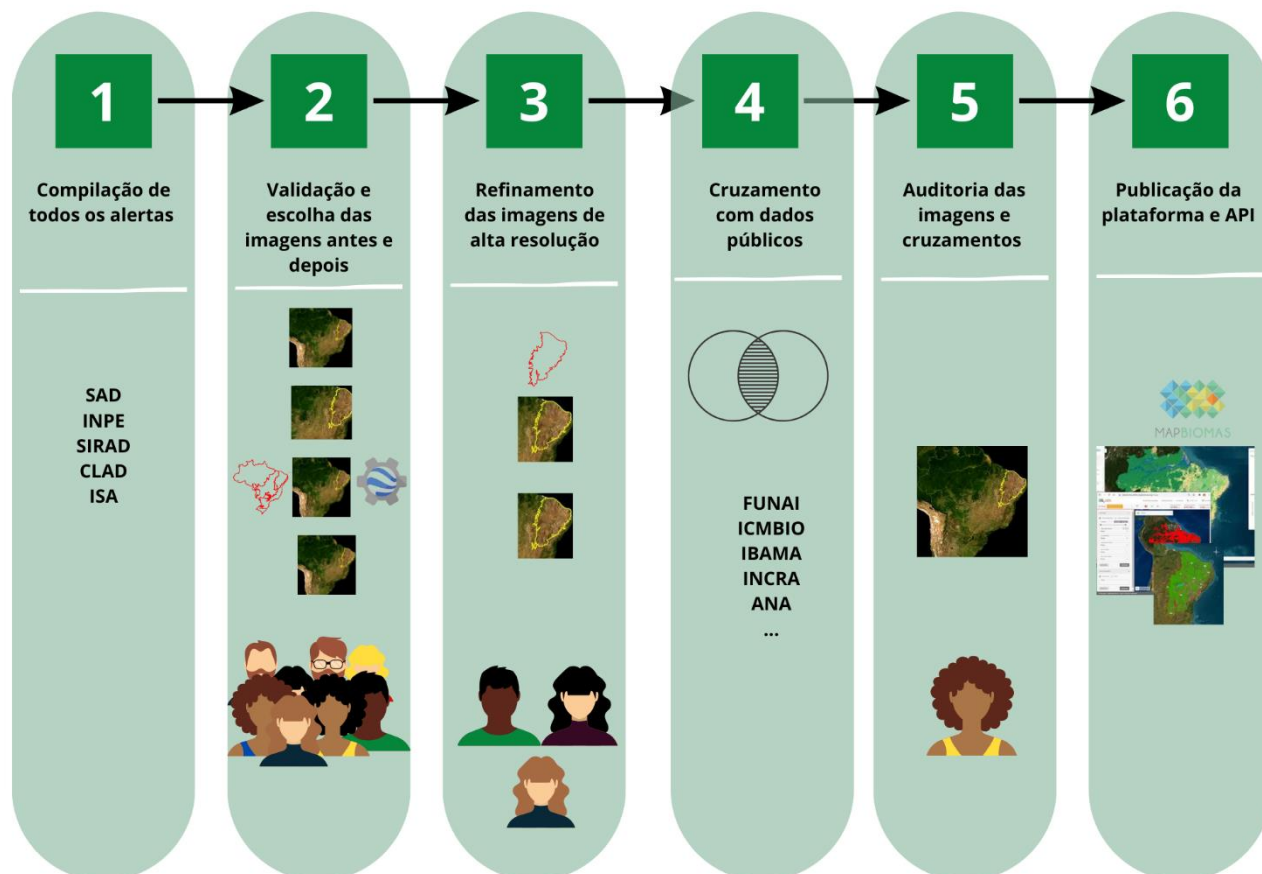


Figura 2 Ilustração do processo de validação, refinamento e cruzamento dos dados de desmatamento com os dados obtidos de outras bases existentes. Fonte: MAPBIOMAS (2022) reproduzida pelos autores.

Aquisição de dados de Fogo

Os dados de monitoramento de incêndios foram obtidos na plataforma MapBiomas Fogo Coleção 2, utilizando imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8. O algoritmo Deep Neural Network foi treinado com 70% das amostras coletadas de áreas queimadas e não queimadas de 28 regiões do Brasil. Após a classificação das imagens, foram aplicados filtros para remover ruídos e identificar áreas queimadas. Para determinar o mês do incêndio, foi realizado um processamento adicional com base na data das imagens (MapBiomas, 2022). Dados climáticos do bioma Caatinga

Para compreender a dinâmica do fogo, é crucial analisar as variáveis que influenciam sua propagação, sendo o clima uma delas, pois biomas com temperaturas elevadas e baixo índice pluviométrico tendem a ser mais suscetíveis a incêndios (Chen et al., 2024). Os dados climáticos foram obtidos no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Posteriormente, os dados de queimada (MCD45A1) foram processados conforme a metodologia de Silva Júnior et al.

(2018), com reprojeção para o sistema WGS84, a fim de uniformizar e mitigar distorções dos dados. O cálculo da anomalia das queimadas e da chuva foi realizado conforme descrito por Aragão et al. (2007), utilizando a equação (1).

$$X_{anomalia} = X - (\sum(1990-2022)/N) \div \sigma(1990-2022) \quad (1)$$
 onde, $X_{anomalia}$ representa a anomalia de chuva ou de queimadas para o ano em questão. O valor de X corresponde ao total de chuva (em milímetros) ou área queimada (em quilômetros quadrados) do ano em análise. $\sum(D_i - D_f)$ representa a subtração entre o ano inicial e o ano final da análise, dividindo pelo número de anos avaliados (N), e o σ refere-se ao desvio padrão da mesma série para chuva ou queimada.

Análise do impacto do fogo na vegetação

No intuito de analisar o impacto do fogo na vegetação da Caatinga, será utilizada a técnica "Differences-in-Differences", conforme descrito por Pessoa et al. (2023), seguindo a Equação (2), que compara o impacto entre diferentes áreas: uma representando a vegetação nativa do bioma e outra

área afetada pelo fogo. Isso possibilitará a análise do impacto do fogo na vegetação.

$$\text{Fire}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{D-PA}_{it} + X_{it} \Phi + D_{it} \Theta + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

onde, "i" indica pixel e "t" ano, a variável dependente é uma medida de fogo, D-PA é a variável dummy de tratamento, que assume valor um se o i-ésimo pixel é protegido no t-ésimo ano, os vetores X e D contêm, respectivamente, covariáveis observáveis variáveis no tempo e dummies de ano, e μ_i é a heterogeneidade não observável.

Resultados e discussão

Temperatura da Superfície dos Oceanos e Variabilidade da Chuva no Bioma Caatinga.

A figura 3, mostra a variação mensal dos índices de anomalia da temperatura dos oceanos e de precipitação de chuva entre 1990 e 2022 no bioma Caatinga. O ONI mede as anomalias de temperatura da superfície do mar (SST) na região do Pacífico e monitora os eventos de El Niño (valores positivos) e La Niña (valores negativos). Para este indicador climático, os maiores valores de El Niño foram de 2,64°C em 2015. Quando esses eventos ocorrem, a redução das chuvas tende a ser mais acentuada (Dutra et al., 2023; Ferreira et al., 2023; Mastachi-Loza et al., 2024).

Matavelli et al., (2023) ao investigarem as dinâmicas e os impactos dos incêndios florestais na América do Sul, concluíram que 87% dos incêndios ocorreram em anos de seca, ao mesmo tempo que a fragmentação vegetal aumentou 239%, durante esses fenômenos. Da mesma maneira que, Medeiros et al., (2024) ao caracterizarem os padrões temporais das queimadas nos biomas brasileiros, constataram que somente nos eventos climáticos de 2007 e 2010, a área atingida foi 240% maior do que em anos sem o episódio de El Niño. Sendo que, somente no bioma Caatinga, 67% dos incêndios ocorreram entre setembro e outubro, devido a ausência de chuvas e a altas temperaturas (Medeiros et al., 2024).

Os valores mais elevados de La Niña foram de -1,66°C no ano de 2000. O PDO, que mede a

temperatura do Pacífico Norte, apresentou valores máximos de 2,55°C em 1998, enquanto o valor mínimo foi de -3,11°C em 2021. Embora nesses eventos a recorrência de incêndios seja menor devido ao aumento das chuvas e à recuperação vegetal, as chances de incidência das queimadas de origem natural oriundo das descargas elétricas são mais recorrentes (Schuchmann et al., 2024).

Esses eventos são responsáveis pelo aumento dos níveis de precipitação, que, embora sejam importantes para a recarga dos aquíferos e recuperação vegetal, quando elevados, geram chuvas excessivas. Somados às características pedológicas e à pouca cobertura vegetal do bioma (H. Araújo et al., 2023), tendem a favorecer o escoamento superficial, a perda de nutrientes do solo, o aumento dos processos erosivos e dificultam a recarga do lençol freático nas áreas impactadas (Schuchmann et al., 2024) e aumento na emissões de CO₂, devido a perda da capacidade de estoque de carbono no solo.

O AMO, mensura a temperatura do mar no Atlântico Norte, apresentou um valor máximo de 622 em 2022 e um valor mínimo de -396 em 1992. As anomalias de chuva, que se referem às variações na quantidade de chuva em relação à média histórica, apresentaram valores máximos de 5,15 em 1994 e valores mínimos de -2,04 em 2016. Quando esses eventos ocorrem simultaneamente com El Niño, como ocorreu em 2015-2016, os períodos de seca são intensificados e o número de queimadas aumenta significativamente (Cordero et al., 2024; Ferreira et al., 2023; Marques, 2024).

Durante essas megassecas, as emissões de CO₂ aumentam a propagação do fogo, o que agrava a perda matéria orgânica do solo e da vegetação, e por consequência o carbono que era pra ser armazenado no solo é emitido para a atmosfera. Durante esse evento, somente na Floresta Amazônica foram emitidos cerca de 0,47 Pg de CO₂ resultante das queimadas, além do aumento das áreas degradadas de 5,5% para 38% e da redução nos estoques de carbono do solo em $24,8 \pm 6,9\%$ (Ferreira et al., 2023).

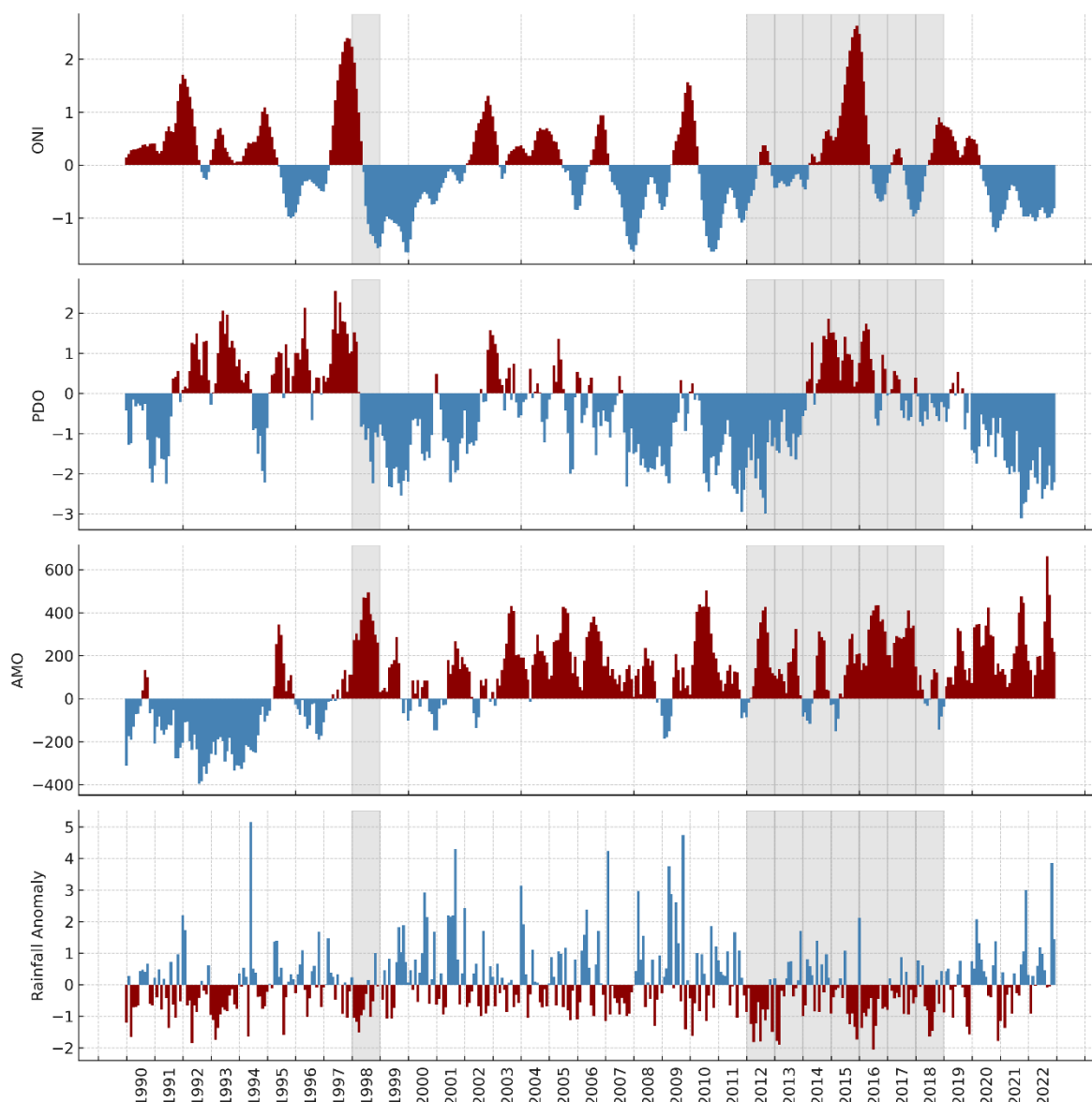


Figura 3- Análise Temporal dos Indicadores Climáticos no Bioma Caatinga (1990-2022). ONI: Índice Oceânico Niño (El Niño e La Niña), PDO: Oscilação Decadal do Pacífico (Pacific Decadal Oscillation), AMO: Oscilação Multidecadal do Atlântico (Atlantic Multidecadal Oscillation). Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Um estudo simulou o impacto dos eventos climáticos na biodiversidade dos cactos do gênero *Tacinga* no bioma e concluiu que a intensificação das secas resultará numa perda de 46% das espécies analisadas até 2070 (Sampaio et al., 2024). Além disso, os valores positivos do PDO, AMO e ENSO têm relação direta com as anomalias de chuva, podendo intensificar tanto a seca quanto as inundações (Cordero et al., 2024; Ferreira et al., 2023; Marques, 2024).

Desmatamento nas Fitofisionomias de Vegetação do Bioma Caatinga

Os resultados mostraram que, no intervalo de tempo de 1990 a 2022, o bioma Caatinga sofreu uma perda total de 153.761,35 km² de sua cobertura de vegetação nativa. Sendo que, o ano de 1990 registrou os índices mais altos para a maioria dos tipos vegetacionais, exceto para a Formação Pioneira (4b), Floresta Ombrófila Densa (4f) e Floresta Ombrófila Aberta (4e), apresentando a perda de uma área de 11.614,76 km². Para a Formação Pioneira, as taxas mais elevadas de desmatamento ocorreu em 1999, com uma área de 152 km², e para as Florestas Ombrófila Densa em 2000 e Ombrófila Aberta em 2001, na ordem de 20 km² e 35 km² (Figura 4). No entanto, ao longo dos anos, o total da área desmatada reduziu-se em

aproximadamente 93%, chegando a 742 km² no último ano analisado.

A vegetação mais afetada foi a Caatinga Senu Stricto (Savana-estépica) (4h), com um desmatamento total de 102.544,48 km², seguida pelos Ecótonos (4a), com 33.125 km² e pela Floresta Estacional Decidual (4c) com uma área de 10.560 km². A Floresta Estacional Semidecidual

(4d) teve um total de 3.581 km² de sua área retirada, enquanto os ecossistemas de Formação Pioneira e Formação Savânica apresentaram valores semelhantes, em torno de 1.600 km² cada. A Floresta Ombrófila Densa e a Floresta Ombrófila Aberta registraram desmatamentos de 238 km² e 459 km², respectivamente.

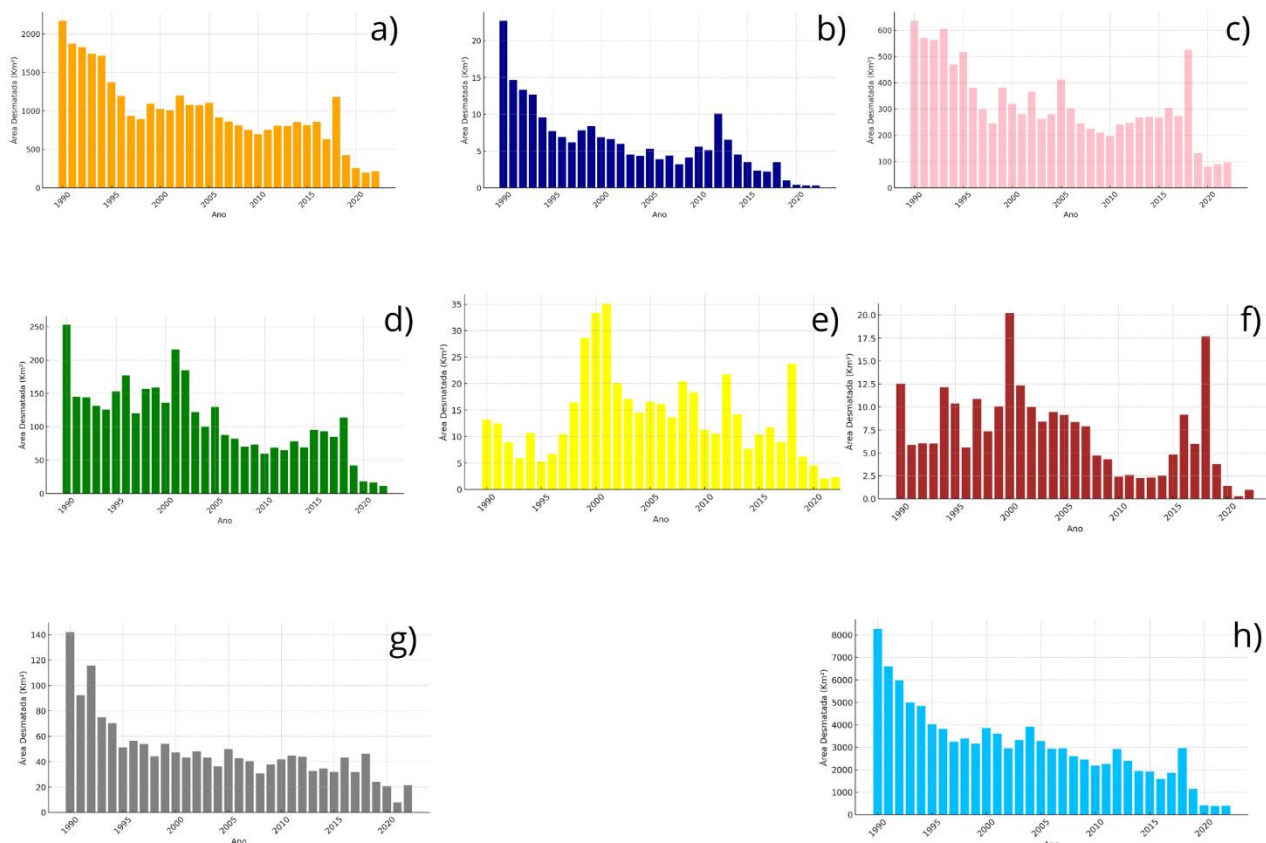


Figura 4. Gráficos de área desmatada para cada tipo de vegetação, de 1990 a 2022. Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os resultados da proporção de desmatamento por tipo de vegetação no bioma Caatinga mostram uma predominância significativa da Caatinga Senu Stricto (67%) (Figura 5), seguida das áreas de Ecótono (22%) e Floresta Estacional Decidual (7%). Pequenas áreas foram identificadas como Floresta Semidecidual

(2%), Formações Pioneiras (1%) e Savana (1%). Já para Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta juntas, os valores foram inferiores a 1%.

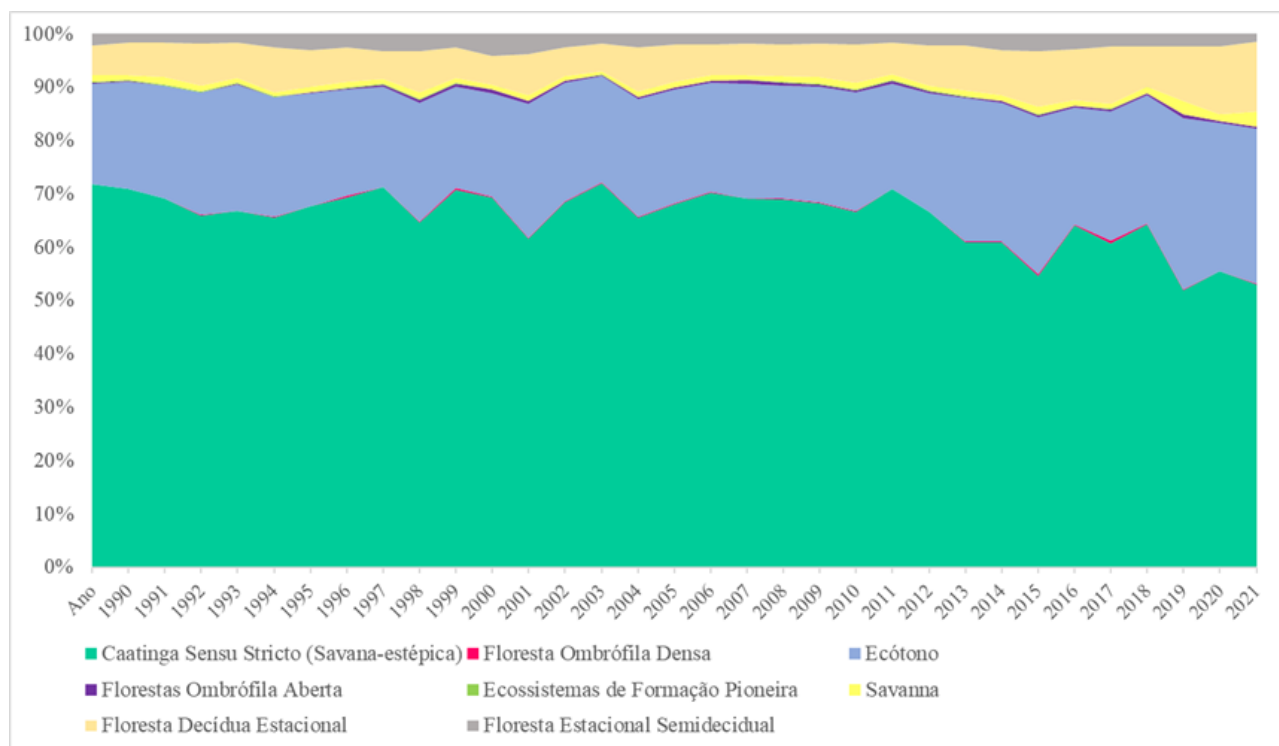


Figura 5 Gráfico de Contribuição Proporcional dos Tipos de Vegetação para as Áreas Desmatadas no Bioma Caatinga. Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Caatinga Sensus Stricto foi a vegetação mais impactada pelo desmatamento, em parte devido à sua vasta extensão, já que essa formação recobre 90% do bioma (Ribeiro et al., 2021). E como é composta de arbustos e árvores de pequeno porte facilita a conversão dessas áreas para o setor agrícola (H. Araújo et al., 2023). Esse setor, por sua vez, é responsável por 22% de todo o desmatamento ocorrido no bioma (MAPBIOMAS, 2023).

Somente de 2003 a 2018, houve um aumento de 370% no uso da terra para a agricultura (Cobelo et al., 2023). Os altos índices de retirada de cobertura vegetal para o setor agropecuário têm sido um fator preocupante. Em 2021, esses valores subiram 237%, o que ressalta a importância de revisar o novo Código Florestal Brasileiro, que facilita a retirada da vegetação para esse setor. Antes dessas mudanças, o Brasil estava prestes a atingir o marco de redução de 80% nos desmatamentos (Matavelli et al., 2022).

O segundo tipo de vegetação mais afetado foram os Ecótonos, áreas de transição entre ecossistemas, o desmatamento dessa formação, sobretudo em uma porcentagem tão elevada como o estudo evidenciou, exerce um impacto significativo sobre a biodiversidade e aos serviços ecossistêmicos, já que naturalmente esses locais possuem altas taxas de endemismo (Madani et al., 2024).

Sendo assim, a degradação dessas regiões é um indicativo de grande perda de riqueza e abundância de espécies (Madani et al., 2024; Santos et al., 2024). Além disso, o desmatamento em ecótonos pode alterar o microclima local, intensificar a fragmentação de habitats e agravar processos de desertificação, que somados às características físicas do bioma Caatinga amplificam a vulnerabilidade e a propagação dos incêndios florestais.

Globalmente, a mudança de uso da terra foi responsável por emitir 34,5% (Gt CO₂-eq) dos gases de efeito estufa em 2019 (Cobelo et al., 2023). No Brasil, o desmatamento e a degradação florestal são os principais responsáveis pela emissão líquida de CO₂, contribuindo com 95% das emissões, o que representa 4,3 Pg e 2,7 Pg, respectivamente (Silva-Junior et al., 2023). No bioma estudado, especificamente, a mudança do uso do território resultou na emissão de mais de 300 milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera entre 1985 e 2009 (Rocha et al., 2024).

Ademais, o desmatamento tende a alavancar inúmeros impactos ambientais, dentre eles o aumento na recorrência de incêndios, já que, em áreas muito fragmentadas, a incidência das queimadas pode chegar até 84% (Matavelli et al., 2023). Além disso, essa fragmentação origina uma perda de até 35% no carbono estocado no solo nos primeiros quatro anos, podendo somar até 8%

nesses valores em anos de seca (Lapola et al., 2023).

A análise dos dados de área afetada por incêndios florestais para cada tipo de formação vegetacional de 1990 a 2022, no bioma Caatinga, revelou que da área total de 149.535,02 km², a distribuição entre os tipos de cobertura foi: Formação Savânica, 119.369,387 km² (80%); Agropecuária, 21.630 km² (14%); Formação Natural Não Florestal, 5.806,94 km² (4%);

Impacto do Fogo na vegetação do bioma Caatinga

Formação Florestal, 2.292,82 km² (2%); Área Não Vegetada, 435,02 km² (0%); e Restinga Arbórea, 0,85 km² (0%) (Figura 6). Os dados mostraram que o ano que apresentou maior área queimada foi 2021, totalizando 7.835,93 km², o que representa 5% da área total. Em contraste, o ano de 2014 teve a menor área queimada, com 1.549,87 km², representando 1% da área total.

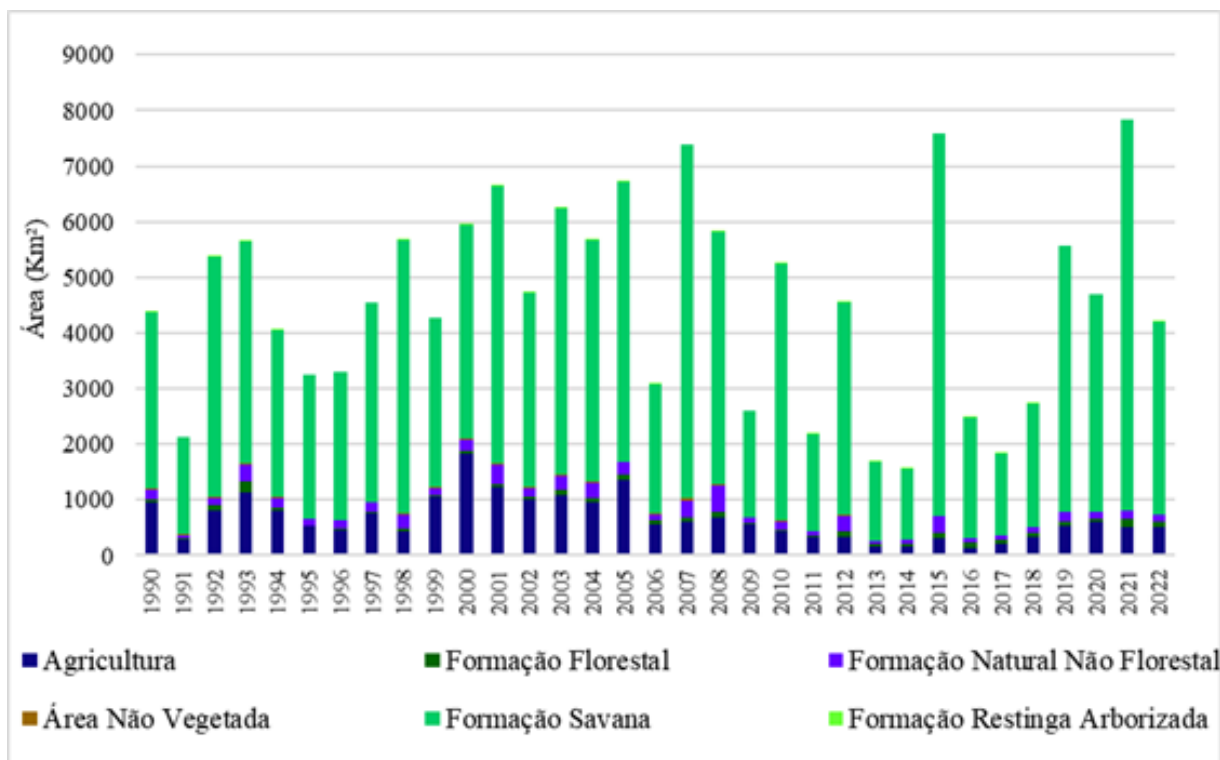


Figura 6- Área de cobertura de por cada do tipo de vegetação, de 1990 a 2022 em km². Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A análise de queimadas pelo tipo de cobertura vegetal evidenciou os seguintes resultados (Figura 7) dos anos de 1990 a 2022. A área total queimada foi de 149.535,02 km². A Formação Savânica apresentou a maior percentagem de área afetada pelos incêndios

florestais, com cerca de 80%, seguida das áreas de Agropecuária com 14%, Formações Naturais Não Florestais com 4% e Formação Florestal com 2%. Áreas Não Vegetadas e Restinga Arbórea apresentaram valores de contribuição nos incêndios florestais inferiores a 1%.

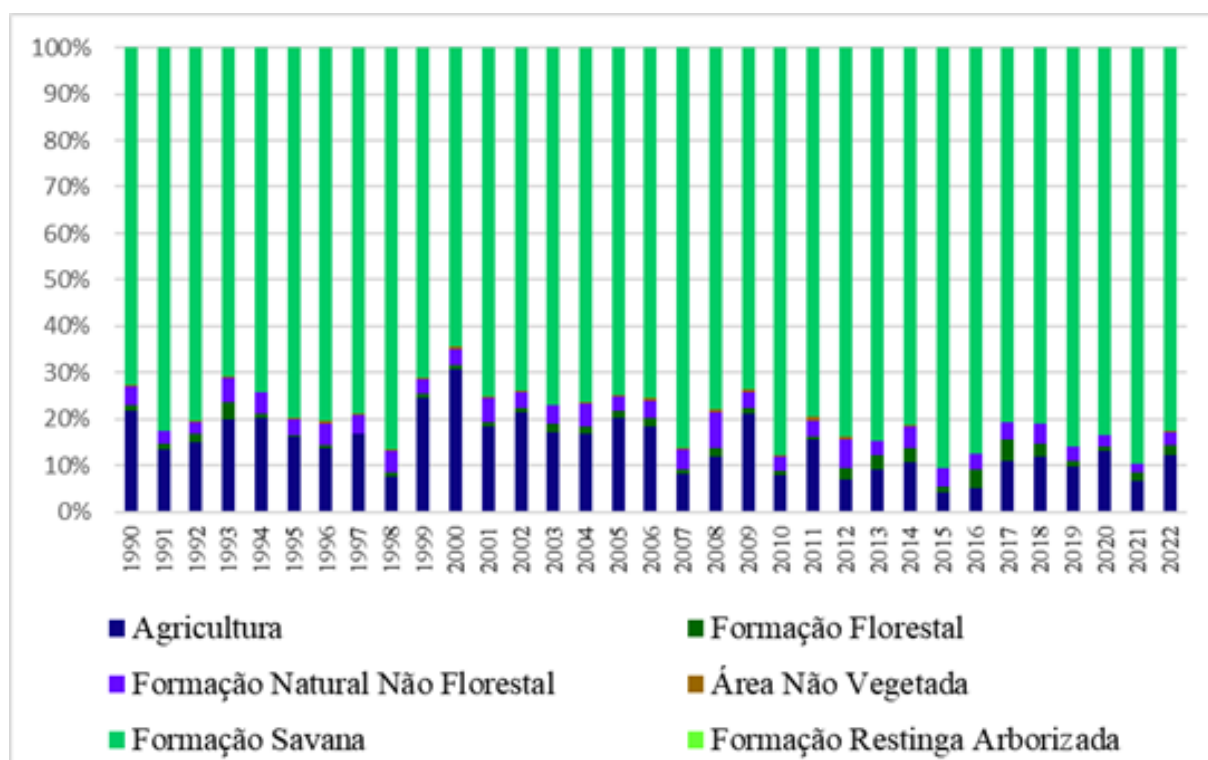


Figura 7. Percentual da contribuição de cada classe de vegetação para a área queimada entre 1990 e 2022.
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A formação savânica foi a vegetação que apresentou os maiores índices de ocorrência de incêndios. Isso se justifica devido às características naturais dessa cobertura, composta por gramíneas, arbustos e árvores em uma matriz aberta, que facilita a ignição dos incêndios (H. Araújo et al., 2023). As áreas agrícolas foram o uso da terra mais afetado pelo fenômeno, e além do impacto ambiental, a recorrência de incêndios nesse tipo de uso causa inúmeros prejuízos econômicos na produção de alimentos, uma vez que o impacto do fogo afeta a produtividade dos solos, alcançando profundidades de 20 a 30 cm (Chebykina et al., 2024).

Estudos sobre o impacto do fogo entre 2005 e 2016 concluíram que, dos 9833 incêndios registrados, 1228 ocorreram em áreas de pastagens (Mastachi-Loza et al., 2024). E isso se deve à fragmentação, à exploração florestal, à disposição de materiais combustíveis e ao aumento de incêndios intencionais em ambientes agropecuários o que os tornam mais propensos ao surgimento de incêndios (Mastachi-Loza et al., 2024).

Os incêndios na região da Caatinga têm se mostrado um cenário preocupante, estima-se que, de 2001 a 2019, foram queimados uma área de 47.000 km² (Oliveira et al., 2022). Somente em

2010, durante um evento de El Niño, a área afetada foi de 436 km², onde, 67% desses eventos ocorreram em setembro e outubro, que são os meses de maior escassez hídrica no bioma (Medeiros et al., 2024). Além disso, as secas extremas favorecem o alastramento das queimadas e facilitam a fragmentação de habitats.

Os incêndios florestais, assim como o desmatamento, originam as formações de borda (Dutra et al., 2023; Leão et al., 2023; Silva Júnior et al., 2022). Esse efeito tende a agravar a emissão de gases de efeito estufa e contribuem para a mudança climática global (Dutra et al., 2024; Leão et al., 2023). Considerando que, com o surgimento dessas formações, ocorre uma perda de carbono de até 35% nos primeiros quatro anos, dentro de um raio de até 1,20 metros do início da borda (Lapola et al., 2023). Além disso, essas formações intensificam a vulnerabilidade das áreas remanescentes, aumentando sua exposição a perturbações como incêndios (Dutra et al., 2023; Matavelli et al., 2023; Pêssoa et al., 2023).

Os incêndios florestais, por sua vez, levam à degradação das florestas, com redução dos estoques de biomassa em até 54% (Leão et al., 2023), AGB em 58% em vegetação primária (Dutra et al., 2024), e comprometem a resiliência dos ecossistemas florestais, que precisam de até 20

anos para recuperarem 80% de sua biomassa perdida durante esses eventos (Dutra et al., 2024). Ademais, após essa perturbação algumas espécies levam até 10 anos para se recompor após incêndios (Lapola et al., 2023).

Somente nos últimos 10 anos, as florestas absorveram cerca de 25–30% das emissões de CO₂ resultantes de modificações antropogênicas (Gomes et al., 2024). Nesse contexto, os incêndios contribuíram significativamente com 62% (4,92 Pg CO₂-e yr⁻¹) das emissões, apenas em áreas de savana (Gomes et al., 2024). Quando uma floresta é queimada, as emissões de CO₂ podem perdurar por mais de sete anos (Lapola et al., 2023).

Mundialmente, os incêndios florestais têm causado uma série de impactos. Desde o ano 2000, foram registrados 2052 mortes, 14.454 feridos e 119.911 pessoas desabrigadas (Mastachi-Loza et al., 2024). Além disso, mais de 30% dos ecossistemas naturais foram atingidos, resultando em uma enorme perda para a biodiversidade (Haque et al., 2023; Mastachi-Loza et al., 2024). Adicionalmente, a fumaça resultante compromete a qualidade do ar, impactando diretamente a saúde respiratória, sendo responsável por 5% das internações na região da Amazônia entre 2005 e 2018 (Campanharo et al., 2022).

Diante dos dados apresentados no estudo, evidencia-se a vulnerabilidade do bioma, associada à sua característica semiárida, e o uso da terra torna a área mais suscetível aos efeitos das queimadas, resultando em impactos severos tanto na estrutura da vegetação quanto na fauna local. As áreas de savana, com vegetação aberta e fácil combustão, foram as mais afetadas, destacando a importância de compreender as dinâmicas do fogo para a formulação de estratégias de mitigação.

Nesse sentido, as discussões evidenciam a urgência de desenvolver métodos eficazes de monitoramento e prevenção de incêndios florestais, além da implementação de políticas de conservação que considerem tanto os aspectos naturais quanto os socioeconômicos desse bioma tão negligenciado. Isso permitirá a geração de dados para criar medidas de fiscalização, já que 18% dos desmatamentos ocorrem em áreas de proteção ambiental (Matavelli et al., 2022). E o bioma Caatinga conta com apenas 8% de áreas de proteção ambiental (Jardim et al., 2022; Rocha et al., 2024), sendo que apenas 1% possui proteção integral (Rocha et al., 2024).

Logo, diante do impacto do fogo nos ecossistemas e a relação entre a propagação com o desmatamento e com as mudanças climáticas, se fazem necessários mais estudos nessa temática nesse bioma. Tendo em vista que o mesmo

apresenta altas taxas de endemismo, sendo que para alguns grupos esse valor é de até 25% (H. Araújo et al., 2023). Entre as espécies endêmicas destacam-se 1.110 espécies de fungos e flora (REFLORA, 2024).

Conclusão

O estudo mostrou que, o bioma Caatinga possui características naturais propícias à incidência de incêndios florestais, como a escassez hídrica, a composição vegetal, o clima e o uso indiscriminado dos recursos naturais. Além disso, esses eventos modificam a paisagem e alteram a composição física, química e biológica da área impactada, dificultando a regeneração dos ecossistemas afetados e aumentando as emissões de CO₂, prejudicando a qualidade do ar e impactando a saúde respiratória da população.

Eventos climáticos extremos, como El Niño, PDO e AMO, com valores positivos, estão associados a períodos prolongados de escassez hídrica, o que influencia no aumento das ocorrências de incêndios. Da mesma forma, eventos como La Niña, PDO e AMO, com valores negativos, podem resultar em chuvas excessivas. Ambos afetam a fertilidade dos solos e a recuperação de habitats, impactando tanto a abundância quanto a riqueza de espécies em diferentes camadas do ecossistema.

Além disso, o estudo mostrou que os anos que apresentaram maiores áreas atingidas pelo fogo, foram anos que apresentaram altos níveis de anomalias de chuva negativa, ou que ocorreram mais de um evento climático simultaneamente. Ademais, as vegetações mais impactadas também foram as que se apresentaram mais fragmentadas, portanto corroborando que o desmatamento deixa os ecossistemas mais frágeis e com isso ficam mais suscetíveis a propagação dos incêndios em grande escala.

Também é evidente a necessidade de estudos no bioma, não apenas sobre o fogo, mas também sobre diversos impactos ambientais. Além disso, os resultados sobre o impacto e os fatores que intensificam o fogo no bioma Caatinga mostraram-se bastante promissores para entender essa dinâmica, pois, com esse conhecimento, torna-se possível reduzir as emissões de GEE, bem como criar medidas eficazes para a prevenção de incêndios florestais e a manutenção da biodiversidade. Portanto, a hipótese de que as altas taxas de desmatamento, assim como os eventos climáticos no bioma Caatinga, intensificam a incidência e a propagação dos incêndios florestais foi comprovada no decorrer do estudo.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), por financiar o projeto YBYRÁ-BR: Quantificação Espaço-temporal das Emissões e Remoções de CO₂ pelas Florestas Brasileiras (Processo CNPq 401741/2023-0), e a Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) pelo auxílio financeiro à pesquisa.

Referências

- Abramov, N., Emelyanova, Y., Fralenko, V., Khachumov, V., Khachumov, M., Shustova, M., & Talalaev, A. (2024). Intelligent methods for forest fire detection using unmanned aerial vehicles. *Fire*, 7(89). <https://doi.org/10.3390/fire7030089>
- Araújo, H. F. P., Canassa, N. F., Machado, C. C. C., & Tabarelli, M. (2023). Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry forest region. *Scientific Reports*, 13, 18440. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45571-9>
- Araújo, L. N. de, Silva, F. K. G. da, Medeiros, M. B. R. G., & Trovão, D. M. B. M. (2023). Importance of land use and rainfall in the dynamics of the Caatinga vegetation cover in Northeastern Brazil. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 45, e68870. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v45i1.68870>
- Aragão, L. E. O. C., Malhi, Y., Roman-Cuesta, R. M., Saatchi, S., Anderson, L.O., & Shimabukuro, Y. E. (2007). Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters*, 34(7), L07701. <http://doi.wiley.com/10.1029/2006GL028946>
- Barbosa, J. V., Nunes, R. A.O., Alvim-Ferraz, M. C.M., Martins, F. G., & Sousa, S. I.V. (2024). Health and economic burden of wildland fires PM_{2.5}-related pollution in Portugal – A longitudinal study. *Environmental Research*, 240, 117490. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117490>
- Brasil. Governo Federal. Secretaria de Comunicação Social. (2024). Brazil's Federal Government deploys over 1,400 personnel to fight Amazon forest fires. Brasília: Gov.br. Retrieved from <https://www.gov.br/pt-br/noticias/latest-news/2024/08/brazils-federal-government-deploys-over-1-400-personnel-to-fight-amazon-forest-fires>
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2024). Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Retrieved from <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/ecossistemas/biomas/caatinga>
- Campanharo, W.A., Morello, T., Christofolletti, M.A.M., & Anderson, L.O. (2022). Hospitalization due to fire-induced pollution in the Brazilian Legal Amazon from 2005 to 2018. *Remote Sens.*, 14(69). <https://doi.org/10.3390/rs14010069>
- Chebykina, E.Y., Abakumov, E.V., Kimeklis, A.K., Gladkov, G.V., Andronov, E.E., & Dymov, A. A. (2024). Wildfires' effect on soil properties and bacterial biodiversity of postpyrogenic histic podzols (Middle Taiga, Komi Republic). *Forests*, 15(145). <https://doi.org/10.3390/fl5010145>
- Chen, N., Tsendbazar, N., Suarez, D. R., Silva Junior, C. H. L., Verbesselt, J., & Herold, M. (2024). Revealing the spatial variation in biomass uptake rates of Brazil's secondary forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 208, 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.12.013>
- Cobelo, I., Castelhana, F. J., Borge, R., Roig, H. L., Adams, M., Amini, H., Koutrakis, P., & Requia, W. J. (2023). The impact of wildfires on air pollution and health across land use categories in Brazil over a 16-year period. *Environmental Research*, 115522. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115522>
- Cordero, R. R., Feron, S., Damiani, A., Carrasco, J., Karas, C., Wang, C., Kraamwinkel, C. T., & Beaulieu, A. (2024). Extreme fire weather in Chile driven by climate change and El Niño–Southern Oscillation (ENSO). *Scientific Reports*, 14(1974). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52481-x>
- Dutra, D.J., Anderson, L. O., Fearnside, P.M., Graça, P.M.L.D.A., Yanai, A.M., Dalagnol, R., Burton, C., Jones, C., Betts, R., & Aragão, L.E.O.E.C.D. (2023). Fire dynamics in an emerging deforestation frontier in southwestern Amazonia, Brazil. *Fire*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/fire6010002>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Mapas de solos do Brasil.2020. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/#/Acesso> em: 07 set. 2023.
- Ferreira, I.J.M., Campanharo, W.A., Barbosa, M.L.F., Silva, S.S.D., Selaya, G., Aragão, L.E.O.C., & Anderson, L.O. (2023). Assessment of fire hazard in Southwestern

- Amazon. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6(1107417). <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1107417>
- Gomes, L., Miranda, H.S., Soares-Filho, B., Rodrigues, L., & Bustamante, M.M.C. (2024). Fire frequency and post-fire intervals in the Cerrado savanna. *Fire*, 7(280), 1-15. <https://doi.org/10.3390/fire7080280>
- Global Forest Watch. (2024). Brazil deforestation rates & statistics. Washington, DC: Global Forest Watch. Retrieved from <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/BRA/?category=fires>
- Haque, M. K., Azad, M. A. K., Hossain, M. Y., Ahmed, T., Uddin, M., & Hossain, M. M. (2021). Wildfire in Australia during 2019–2020, its impact on health, biodiversity and environment with some proposals for risk management: A review. *Journal of Environmental Protection*, 12, 391–414. <https://doi.org/10.4236/jep.2021.126024>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). Área territorial brasileira: Atualização 2022. IBGE. <https://www.ibge.gov.br>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). População do Brasil cresce 6,5% entre 2010 e 2022 e chega a 203,1 milhões de habitantes. IBGE. <https://www.ibge.gov.br>
- IPCC. (2023). Climate change 2023 synthesis report. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.l.]: IPCC. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. do N., Silva, M. V. da, Santos, A. dos, Silva, J. L. B. da, Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J. F. de, Teixeira, A. H. de C., Teodoro, P. E., Lima, J. L. M. P. de, Silva Júnior, C. A. da, Souza, L. S. B. de, & Silva, E. A. (2022). Using remote sensing to quantify the joint effects of climate and land use/land cover changes on the Caatinga biome of Northeast Brazil. *Remote Sensing*, 14(1911). <https://doi.org/10.3390/rs14081911>
- Lapola, D.M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L.E.O.C., Berenguer, E., Carmenta, R., Liddy, H.M., Seixas, H., Silva, C.V.J., Silva-Junior, C.H.L., Alencar, A.A.C., Anderson, L.O., Armenteras, D., Brovkin, V., Calders, K., Chambers, J., Chini, L., Costa, M.H., Faria, B.L., Fearnside, P.M., Ferreira, J., Gatti, L., Gutierrez-Velez, V.H., Han, Z., Hibbard, K., Kovens, C., Lawrence, P., Pongratz, J., Portela, B.T.T., Rounsevell, M., Ruane, A.C., Schaldach, R., Da Silva, S.S., Von Randow, C., & Walker, W.S. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379, 349. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>
- Leão, P. H. A., Freitas, A. L. R., Alvarado, S. T., Reis, J. B. C., Carvalho, I., Silva-Junior, C., Braga, E. V., Rodrigues, T. C. S., Medeiros, T. P., Carvalho, N. S., Campanharo, W. A., Pessoa, A. C. M., Brito, F., Alves, D. B., Bezerra, D., & Ferraz, T. M. (2023). Influência da recorrência do fogo no estoque de biomassa do Maranhão. In *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 20, 156384. ISBN: 978-65-89159-04-9.
- Leão, H., Dutra, D., Medeiros, T., Silva-Junior, C., Alvarado, S., Peripato, V., Silveira, M., De Freitas, A. L., Aragão, L., & Anderson, L. (2024). Estimation of aboveground biomass recovery through chronosequence in forests degraded by fire in the Legal Amazon. *EGU General Assembly* 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-1158>
- Madani, G., Hartley, R., Schulz, M., & Beranek, C. T. (2024). Life on the edge: Considering ecotonal habitat for the conservation of alpine reptile metacommunities. *Journal for Nature Conservation*, 79, 126623. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2024.126623>
- MapBiomass. (2023). Uso e cobertura da terra no Brasil. Retrieved from <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Accessed in 2024.
- MapBiomass. (2022). *Coleções MapBiomass Fire* (Collection 2, Version 1). Retrieved from <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>
- Marques, L. (2024). Crossing tipping points in the Amazon rainforest. *Highlander Journal*, 3, 4-33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10986767>
- Mastachi-Loza, C.A., Paredes-Tavares, J., Becerril-Piña, R., Ruiz-Gómez, M.D.L., Rangel Patiño, C.A., & Diaz-Delgado, C. (2024). The house is burning: Assessment of habitat loss due to wildfires in Central Mexico. *Fire*, 7(134). <https://doi.org/10.3390/fire7040134>
- Mataveli, G., de Oliveira, G., Libonati, R., Silva-Junior, C.H.L., & Anderson, L.O. (2023). Novel approaches and techniques for understanding vegetation fires in South America. *Fire*, 6(275). <https://doi.org/10.3390/fire6070275>
- Medeiros, T. P. de, Dutra, D. J., Ferro, P. D., Leão, H. A., Magalhães, D. S., Silva-Junior, C. H. L., Romero, S. T. A., Escada, M. I. S., Aragão, L. E. O. C., & Anderson, L. O. (2024). Temporal

- patterns of burned area in the Brazilian biomes. *EGU General Assembly 2024*.
- Oliveira, U., Soares-Filho, B., Bustamante, M., Gomes, L., Ometto, J. P., & Rajão, R. (2022). Determinants of fire impact in the Brazilian biomes. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 735017. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.735017>.
- OMM. (2024, 11 de junho). Organização Meteorológica Mundial (OMM), 2023 quebra recordes climáticos, com grandes impactos. <https://wmo.int/media-centre/2023-shatters-climate-records-major-impacts>.
- Pessoa, A. C. M., Morello, R. S., Thiago, F., Silva Junior, C. H. L., Doblas, J., Carvalho, N. S., Aragão, L. E. O. C., & Anderson, L. O. (2023). Protected areas are effective on curbing fires in the Amazon. *Ecological Economics*, 214, 107983. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107983>
- RAD2023: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2023 - São Paulo, Brasil
- MapBiomas, 2024 - 154 páginas
<http://alerta.mapbiomas.org>. DOI: 10.1088/1748-9326/ac5193
- Reflora. (2024). Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Retrieved from <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/ConsultaPublicaUC/ResultadoDaConsultaConsultaTodosNomes.do>. Accessed on August 5, 2024.
- Ribeiro, F. L., Guevara, M., Vázquez-Lule, A., Cunha, A. P., Zeri, M., & Vargas, R. (2021). The impact of drought on soil moisture trends across Brazilian biomes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 879-892. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-879-2021>
- Rocha, W. J. S., Vasconcelos, R. N., Costa, D. P., Duverger, S. G., Lobão, J. S. B., Souza, D. T. M., Herrmann, S. M., Santos, N. A., Franca Rocha, R. O., Ferreira-Ferreira, J., Oliveira, M., Barbosa, L. S., Cordeiro, C. L., & Aguiar, W. M. (2024). Towards uncovering three decades of LULC in the Brazilian drylands: Caatinga biome dynamics (1985–2019). *Land*, 13(1250). <https://doi.org/10.3390/land13081250>
- Rodrigues, J. A. M., Lopes, P. M. O., Silva, J. L. B., Araújo, H. L., Silva, M. V., Santos, A., Batista, P. H. D., & Moura, G. B. A. (2020). Spatial-temporal dynamics of Caatinga vegetation cover by remote sensing in the Brazilian semiarid region. *DYNA*, 87(215), 109-117. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.87851>
- Sampaio, A. C. P., Cavalcante, A. M. B., Albuquerque, F. S., & Randow, C. (2024). The impacts of the exposure of cactus species of the genus *Tacinga* to climate change in the Caatinga biome. *Acta Botanica Brasilica*, 38, e20230177. <https://doi.org/10.1590/1677-941X-ABB-2023-0177>
- Santos, C. R., Oda-Souza, M., Almeida Jr., E. B. de, & Zickel, C. S. (2024). Effects of urban ecosystem under the diversity and structure of two forest ecotones in Maranhão state. *Urban Ecosystems*, 27, 399–416. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01449-2>.
- Schuchmann, K.L., Burs, K., de Deus, F., Fieker, C.Z., Tissiani, A.S., & Marques, M.I. (2024). Bird community traits in recently burned and unburned parts of the Northeastern Pantanal, Brazil: A preliminary approach. *Sustainability*, 16(2321). <https://doi.org/10.3390/su16062321>
- Sharma, A., Nayyar, A., Singh, K. J., Kapoor, D. S., Thakur, K., & Mahajan, S. (2023). An IoT-based forest fire detection system: Design and testing. *Multimedia Tools and Applications*, 1(3), 1-27. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-17027-9>
- Silva Junior, C. H. L., Almeida, C. T., Santos, J. R. N., Anderson, L. O., Aragão, L. E. O. C., & Silva, F. B. (2018). Spatiotemporal rainfall trends in the Brazilian Legal Amazon between the years 1998 and 2015. *Water*, 10(9), 1220. <https://doi.org/10.3390/w10091220>
- Silva-Junior, C.H.L., Silva, C., Alvarado, S.T., Rosan, T.M., Bispo, P.C., & Anderson, L.O. (2023). Editorial: Remote sensing of environmental changes in the Neotropical region. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6(1330489). <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1330489>
- Silva-Junior, C.H.L., Buna, A.T.M., Bezerra, D.S., Costa, O.S., Jr., Santos, A.L., Basson, L.O.D., Santos, A.L.S., Alvarado, S.T., Almeida, C.T., Freire, A.T.G., et al. (2022). Forest fragmentation and fires in the Eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil. *Fire*, 5(77). <https://doi.org/10.3390/fire5030077>
- Teixeira, A., Leivas, J., Takemura, C., Bayma, G., Garçon, E., Sousa, I., Farias, F., & Silva, C. (2023). Remote sensing environmental indicators for monitoring spatial and temporal dynamics of water and vegetation conditions: Applications to the Brazilian biomes. *Researcher Square*, 00, 1–15. <https://doi.org/10.1111/aec.13369>