



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

MARIANA DE AQUINO ARAGÃO

**ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA
CAATINGA**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2025

MARIANA DE AQUINO ARAGÃO

**ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA
CAATINGA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Florestais, na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas -
SIBI/UFES e elaborada pelo autor

A659a Aragão, Mariana de Aquino, 1992-
Áreas prioritárias para prevenção de incêndios florestais na
Caatinga. / Mariana de Aquino Aragão. - 2025.
116 f. : il.

Orientador: Nilton Cesar Fiedler.

Coorientador: Alexandre Rosa dos Santos.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Lógica Fuzzy-AHP. 2. Sistemas de Informações Geográficas.
3. Floresta seca. 4. Caatinga. 5. Prevenção de incêndios. 6. Proteção
florestal. I. Fiedler, Nilton Cesar. II. Santos, Alexandre Rosa dos. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias
e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630*38

**ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA
CAATINGA**

Mariana de Aquino Aragão

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 26 de março de 2025.

Documento assinado digitalmente
 JEFERSON LUIZ FERRARI
Data: 28/03/2025 11:03:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Jéferson Luiz Ferrari (Examinador externo)
Instituto Federal do Espírito Santo Campus de Alegre



Profª. Drª Telma Machado Oliveira Peluzio (Examinadora externa)
Instituto Federal do Espírito Santo Campus de Alegre

Documento assinado digitalmente
 PATRICIA CARNEIRO SOUTO
Data: 27/03/2025 18:47:38-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profª. Drª. Patrícia Carneiro Souto (Examinadora externa)
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 DANILO SIMÕES
Data: 28/03/2025 12:19:55-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Danilo Simões (Examinador externo)
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"



Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

“Pelas aulas de vida que ganhei
de quem mais entendia da matéria.
Pelos sonhos que já realizei,
inclusive os mais loucos, irrealis,
impossíveis, talvez irracionais,
aprendi a voar de pés no chão.
Vou pintar com a cor da gratidão
os cabelos prateados dos meus pais.”

Bráulio Bessa

AGRADECIMENTOS

Quatro anos se passaram desde a decisão em retomar a pós-graduação e iniciar o doutorado. Me recordo que o pensamento que regia aquela época era: em quatro anos, onde quero estar? Sabia que onde estava não era o meu lugar, mas não imaginava que sair dali me faria trilhar um caminho tão enriquecedor. Nesses quatro anos eu pude revisitar sonhos adormecidos e viver histórias incríveis e inimagináveis. O crescimento profissional que o doutorado proporciona é diretamente proporcional a infinidade de lições pessoais que a vida nos traz. E aqui, nessa reta final para conclusão deste ciclo, tenho a alegria em poder agradecer a todos que, em algum instante, participou ou torceu para que esta etapa fosse cumprida.

A Deus, agradeço com todo coração e fé, por ter sido sustento nos momentos de maior dificuldade e angústia. Foi Ele quem acalmou os meus medos, enxugou minhas lágrimas e me amparou nos dias em que mais precisei. Sou grata a Ele pela vida, pela saúde, pelas oportunidades e por ser a certeza que nunca estarei só.

Aos meus pais, Marise e Pedro, a quem dedico esta conquista, agradeço a confiança e apoio na realização de cada um dos meus sonhos. Obrigada por terem sido suporte e acreditarem desde o início da minha caminhada que a educação seria a ferramenta para alcançar grandes vitórias. Sei que, por vezes, abdicaram de desejos próprios para sonharem comigo. Sou grata por tudo e espero honrar para sempre a vida de vocês.

Aos meus irmãos, Felipe e Rogério, primos, primas, tios e tias, agradeço a torcida e pelo apoio em tudo que me propus a fazer. Cada palavra de incentivo e carinho foram fundamentais para me fortalecer e seguir em busca daquilo que desejo.

Ao meu companheiro Robert, que nos últimos dois anos, foi suporte e afeto para continuar em direção às minhas conquistas, obrigada pelo apoio, carinho e dedicação. Meus agradecimentos se estendem a toda a família Gomes, em especial Marlene, Romildo e Gabriel, por todo acolhimento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e a Universidade Federal do Espírito Santo, por ter sido casa durante essa segunda temporada, obrigada pela estrutura e por todas as oportunidades para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À CAPES pela concessão da bolsa durante os três primeiros anos dessa pesquisa, à FAPES pela oportunidade na realização de estágio técnico científico e

participação de evento em Portugal. À Universidade Trás dos Montes e Alto Douro e ao professor Domingos Lopes pela recepção e desenvolvimento de estágio.

Ao meu orientador, Nilton Cesar Fiedler, pela orientação e apoio na realização desta pesquisa e pelas boas risadas durante os cafés da tarde. Ao meu coorientador, Alexandre Rosa dos Santos, pelo incentivo e disponibilidade em sanar todas as dúvidas durante a execução deste trabalho. Aos dois, agradeço a confiança a mim dedicada e compreensão para a finalização desse período à distância.

À Taís Rizzo e ao Antônio Henrique Ramalho, agradeço a amizade e toda dedicação disponibilizada durante a realização desta pesquisa, principalmente neste último ano, vocês foram fundamentais para que fosse possível o desenvolvimento e finalização desse trabalho. Ao Jeferson Pereira, agradeço o auxílio na aquisição de dados.

Aos membros das bancas de projeto, qualificação e defesa, que se dispuseram a participar e contribuir para a minha formação, realização e finalização desta pesquisa, muito obrigada.

Aos meus colegas e amigos do NUPEME e do ECOFIRE, Fernanda Moura, Leonardo Biazatti, Patrícia Borges, Rayane Menezes, Luana Rodrigues, William Masioli, Gabriel Severo, Alehandro Gamas e Bruno Novaes, obrigada pelo amparo, sorrisos, parceria e incentivo durante esses anos, vocês foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo e presença importante para o meu crescimento profissional e pessoal.

Aos amigos que a UFES e Jerônimo Monteiro me trouxeram, sejam eles no período do mestrado ou doutorado, obrigada por serem família. A trajetória realizada ao lado de companheiros de batalha fica mais leve e agradável para ser vencida. Obrigada pelos conselhos, sorrisos, conversas, desabafos, festas, treinos, viagens, aventuras, almoços, jantares, brincadeiras e pelo sentimento de saudade em ter feito boas amizades.

Aos bons e velhos amigos, que mesmo depois de uma longa jornada vivendo os desafios dos quilômetros de distância, seguem torcendo e vibrando por cada vitória. Obrigada por serem suporte.

Aos meus colegas do Instituto Água e Terra – Paraná, agradeço o acolhimento e compreensão durante este último ano. Obrigada por compreenderem o momento e torcerem para que tudo ficasse bem.

Aos professores e educadores que fizeram parte da minha formação pessoal e profissional, obrigada por serem exemplo e por contribuírem para que eu alcançasse esse título, muito obrigada.

Enfim, eu não sabia como seria trilhar esse caminho e por muitas vezes não imaginava que chegaria até aqui, mas foi possível e era para acontecer. A todos que, de alguma forma, vibraram para que este dia chegasse. Meu muito obrigada!!

RESUMO GERAL

ARAGÃO, MARIANA DE AQUINO. **Áreas Prioritárias para Prevenção de Incêndios Florestais na Caatinga**. 2025. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler. Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

A Caatinga, Bioma exclusivamente brasileiro, localizada ao nordeste do país, corresponde ao maior núcleo de floresta tropical sazonalmente seca do mundo. Nesse ambiente, os fatores climáticos e ambientais, associados a grande exploração humana, contribuem significativamente para a degradação do ecossistema, tornando-o um dos mais ameaçados do planeta. Apesar de historicamente ser considerada como independente da ação do fogo, ao longo dos anos, a Caatinga tem sido constantemente acometida pelos incêndios florestais, o que pode transformá-la em um Bioma sensível. Nesse contexto, este estudo foi subdividido em dois capítulos com os seguintes objetivos: Capítulo I: analisar o comportamento dos incêndios florestais na Caatinga ao longo de 10 anos (2011-2020), associando a estes eventos as características ambientais que podem impulsionar ou reduzir o risco; Capítulo II: propor um zoneamento de risco de incêndios florestais para o Bioma e, a partir dele, delimitar áreas com maior necessidade de ações preventivas aos incêndios florestais, a fim de proporcionar conservação da biodiversidade local. Para alcançar esses objetivos, foram utilizadas ferramentas de geotecnologia, estatística e computacional. Ao longo dos anos analisados, o ano de 2015 foi o que apresentou maiores áreas queimadas. O estado do Piauí foi espacialmente o de maior vulnerabilidade à ocorrência do fogo. Quanto as características ambientais, regiões com altitudes inferiores a 600 m; temperatura do ar superior a 24 °C; índice de precipitação pluviométrica inferior a 900 mm, severidade de seca variando de fraca a extrema, evapotranspiração potencial superior a 1.500 mm; índice de vegetação por diferença normalizada de vigor baixo a moderado; índice de área foliar inferior a 3,5 e de Formação Savânica são as que mais impulsionaram a ocorrência de incêndios na Caatinga. As variáveis topográficas, declividade e orientação do relevo, isoladamente, não demonstraram características capazes de indicar maior ou menor propensão ao fogo. No que diz respeito a modelagem de risco, o uso da Lógica *Fuzzy* associada a técnica de Processo de Hierarquia Analítica - AHP, permitiu uma modelagem precisa para o Bioma estudado, com 96,6 % de assertividade, classificando a Caatinga como

de alto a muito alto risco à ocorrência de incêndios florestais. As porções norte e oeste da Caatinga, com destaque para os limites com o Bioma Cerrado, foram as regiões onde o modelo indicou muito alto risco de incêndios. Assim como observado no histórico de ocorrência, o estado do Piauí obteve maior representatividade de áreas para a prevenção aos incêndios, seguido da Bahia e Ceará. De modo geral, as vegetações inseridas em propriedades privadas têm maior necessidade de proteção (92,02 %) devido à fragmentação e à proximidade com atividades agrícolas. As unidades de conservação e terras indígenas englobaram 7,98 % das áreas onde devem ser adotadas medidas de prevenção aos incêndios florestais, com destaque para a categoria de uso sustentável, modalidade Área de Proteção Ambiental. Neste contexto, esses resultados indicam a necessidade de gestão pública que previnam a ocorrência de incêndios em um Bioma até então considerado independente do fogo, principalmente em áreas particulares e na transição Caatinga-Cerrado.

Palavras-chave: Uso do fogo; Floresta seca, Geotecnologia, *Fuzzy-AHP*.

GENERAL ABSTRACT

ARAGÃO, MARIANA DE AQUINO. **Priority Areas for Forest Fire Prevention in the Caatinga**. 2025. Tese (PhD in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler. Co-Advisor: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

The Caatinga, an exclusively Brazilian biome located in the northeast of the country, is the largest seasonally dry tropical forest in the world. In this environment, climatic and environmental factors, associated with extensive human exploitation, contribute significantly to the degradation of the ecosystem, making it one of the most threatened on the planet. Although historically considered independent of the action of fire, over the years, the Caatinga has been constantly affected by forest fires, which can transform it into a sensitive biome. In this context, this study was subdivided into two chapters with the following objectives: Chapter I: to analyze the behavior of forest fires in the Caatinga over a 10-year period (2011-2020), associating these events with the environmental characteristics that can increase or reduce the risk; Chapter II: to propose a forest fire risk zoning for the biome and, based on this, delimit areas with the greatest need for preventive actions against forest fires, in order to provide conservation of local biodiversity. To achieve these objectives, geotechnology, statistics and computational tools were used. Over the years analyzed, 2015 was the year with the largest burned areas. The state of Piauí was spatially the most vulnerable to fire. Regarding environmental characteristics, regions with altitudes below 600 m; air temperature above 24 °C; rainfall index below 900 mm; drought severity ranging from mild to extreme; potential evapotranspiration above 1,500 mm; vegetation index by normalized difference of low to moderate vigor; leaf area index below 3.5 and Savanna Formation are the ones that most drove the occurrence of fires in the Caatinga. The topographic variables, slope and orientation of the relief alone, did not demonstrate characteristics capable of indicating greater or lesser propensity for fire. Regarding risk modeling, the use of Fuzzy Logic associated with the Analytical Hierarchy Process (AHP) technique allowed for accurate modeling for the studied biome, with 96.6% accuracy, classifying the Caatinga as having a high to very high risk of forest fires. The northern and western portions of the Caatinga, especially the borders with the Cerrado biome, were the regions where the model indicated a very high risk of fires. As observed in the history of occurrence, the state of Piauí had the

greatest representation of areas for fire prevention, followed by Bahia and Ceará. In general, vegetation located on private properties has a greater need for protection (92.02%) due to fragmentation and proximity to agricultural activities. Conservation units and indigenous lands encompassed 7.98% of the areas where forest fire prevention measures should be adopted, with emphasis on the sustainable use category, Environmental Protection Area modality. In this context, these results indicate the need for public management to prevent the occurrence of fires in a Biome previously considered independent of fire, especially in private areas and in the Caatinga-Cerrado transition.

Keywords: Fire use; Dry forest, Geotechnology, *Fuzzy-AHP*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	15
REFERÊNCIAS.....	17
2. OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo geral	21
2.2 Objetivos específicos	21
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1 Bioma Caatinga.....	22
3.1.1 Fitofisionomias da Caatinga	24
3.2 Incêndios florestais na Caatinga	32
3.3 Características ambientais que impulsionam a ocorrência do fogo.....	32
3.3.1 Variáveis topográficas	34
3.3.2 Variáveis climáticas	35
3.3.3 Variável vegetal	36
3.4 Modelagem de risco de incêndios florestais.....	37
3.5 Áreas prioritárias para prevenção aos incêndios florestais	38
4. REFERÊNCIAS.....	39
CAPÍTULO I – INCÊNDIOS FLORESTAIS NA CAATINGA: DINÂMICA DE OCORRÊNCIA E CARACTERÍSTICAS IMPULSIONADORAS	45
1. INTRODUÇÃO	46
2. MATERIAL E MÉTODOS	48
2.1 Área de estudo	48
2.2 Base de Dados.....	49
2.3 Caracterização ambiental e incêndios florestais	51
2.4 Correlação das variáveis ambientais.....	51
3. RESULTADOS.....	52
3.1 Caracterização do Bioma Caatinga quanto as variáveis de risco.....	52
3.2 Dinâmica da ocorrência de incêndios florestais	59
3.3 Características ambientais X Incêndios florestais	61
3.4 Correlação das variáveis ambientais.....	64
4. DISCUSSÃO	65
5. CONCLUSÕES	69
6. REFERÊNCIAS.....	70

CAPÍTULO II – DELIMITAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA CAATINGA.....	75
1. INTRODUÇÃO	77
2. MATERIAL E MÉTODOS	79
2.1 Área de estudo	79
2.2 Base de Dados.....	80
2.2.1 Variáveis topográficas	80
2.2.2 Variáveis antrópicas	82
2.2.3 Variáveis climáticas	82
2.2.4 Variáveis vegetacionais.....	82
2.2.5 Cicatrizes de incêndios.....	83
2.2.6 Variáveis para delimitação de áreas prioritárias	84
2.3 Modelagem do risco de incêndios florestais com Lógica <i>Fuzzy</i>	85
2.3.1 Correlação entre variáveis.....	85
2.3.2 <i>Fuzzy</i> ificação das variáveis.....	86
2.3.3 Sobreposição das camadas <i>Fuzzy</i> – AHP	89
2.3.4 Reclassificação do <i>Fuzzy</i> – AHP.....	91
2.3.5 Validação do modelo de risco	92
2.4 Delimitação de áreas prioritárias para prevenção de incêndios	92
3. RESULTADOS.....	93
3.1 Modelagem do risco de incêndios florestais com Lógica <i>Fuzzy</i>	93
3.2 Delimitação de áreas prioritárias para prevenção de incêndios	100
4. DISCUSSÃO	105
4.1 Risco de incêndios florestais com Lógica <i>Fuzzy</i>	105
4.2 Áreas prioritárias para prevenção de incêndios	107
5. CONCLUSÕES	110
6. REFERÊNCIAS.....	110
CONCLUSÕES GERAIS	116

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Bioma Caatinga, maior núcleo de floresta tropical sazonalmente seca do mundo (Moro *et al.*, 2016; Sá *et al.*, 2021), ocupa cerca de 862.818 km (10,1% do território brasileiro), abrangendo territórios dos estados do Ceará, a maior parte do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, sudeste do Piauí, oeste de Alagoas e Sergipe, norte e centro da Bahia e uma faixa do norte de Minas Gerais, correspondendo ao quarto maior Bioma no território nacional (Gariglio *et al.*, 2010; Leal *et al.*, 2005).

A Caatinga apresenta vegetação heterogênea, decídua e descontínua, variando de arbustos à pequenas manchas de florestas altas e secas, das quais podem conter espinhos e algumas características xerofíticas (Leal; Tabarelli; Silva, 2003). O Bioma é caracterizado por um alto nível de degradação por atividades antrópicas e variação sazonal, com períodos de temperatura elevada e pluviosidade reduzida, causando balanço hídrico negativo e alto índice de aridez, o que por consequência, afetam o crescimento da vegetação, alteram o uso e ocupação do solo e implicam em grande impacto social e econômico à população (Barbieri, 2011; Giulietti *et al.*, 2004; Moro *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2016; Sá *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2017).

Os fatores meteorológicos, associados à grande atividade antropogênica, tornam os ambientes semiáridos como um dos mais ameaçados do planeta (Moro *et al.*, 2016), caracterizando o Bioma como de alta sensibilidade às mudanças climáticas (Koutroulis, 2019). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), estima-se que as emissões de gases do efeito estufa causadas pelas atividades antrópicas, iniciadas no período da Revolução Industrial (século XVIII), tenham causado um aumento de 1,0 °C na temperatura global, podendo atingir 1,5 °C entre 2030 e 2052, caso continue a aumentar no ritmo atual (IPCC, 2018).

De acordo com Cirilo (2008), em um ambiente com alterações climáticas, espera-se a ocorrência de chuvas mais intensas nas regiões úmidas, com presença de veranicos e ondas de calor mais frequentes. Em contrapartida, no cenário de mudanças climáticas mais otimista do IPCC, as projeções para as regiões de semiárido sinalizam aumento da temperatura em 1 a 3 °C e redução de 10 a 15% na precipitação, ocorrendo em período ainda mais concentrado. Desse modo, impactos substanciais são previstos sob as regiões de clima mais quente quando submetidos a cenários de mudanças climáticas (Koutroulis, 2019).

Estudos indicam que o aumento da temperatura e a variabilidade no regime das chuvas, ocasionarão impactos diretos na intensidade e frequência dos eventos de incêndios (Aragão *et al.*, 2008; Fonseca *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2016; Silva Junior; Pacheco, 2021; Torres *et al.*, 2011), inclusive em cenários mais otimistas (Silva; Juvanol; Miranda, 2023). De modo geral, os incêndios florestais são agravados concomitantemente à problemática das mudanças climáticas. Enquanto os incêndios são intensificados pelas alterações do clima devido aos eventos de seca, temperatura elevada, baixa umidade relativa do ar, raios e ventos fortes; a mudança climática é agravada pela ocorrência de incêndios, principalmente pela destruição de ecossistemas sensíveis e ricos em carbono (UNEP, 2022).

Apesar de ser considerado como um ecossistema independente do fogo (as ocorrências do fogo são raras, e apresentam papel nulo sobre a dinâmica) (Myers, 2006) e ainda pouco estudado quando se refere a esta problemática (Lucas, 2020), a Caatinga constantemente é acometida por incêndios florestais, principalmente devido a causas antrópicas (Jesus *et al.*, 2019; Leite *et al.*, 2017; Vieira, 2021), o que pode transformá-la em um Bioma sensível ao fogo (Pivello *et al.*, 2021). Ao longo dos anos de 2021, 2022 e 2023, o Bioma apresentou valores de áreas queimadas superiores ao médio anual, tornando-se o terceiro Bioma a mais queimar nestes anos no Brasil (MAPBIOMAS, 2023).

Esses números indicam que a Caatinga necessita de atenção científica no que diz respeito às ocorrências e danos dos incêndios florestais, bem como ao uso de ferramentas capazes de auxiliar na predição das áreas mais propensas ao fogo e em quais regiões devem priorizadas para prevenção, o que possibilitará um planejamento mais assertivo nas tomadas de decisão durante o combate e à conservação do Bioma (Bhadoria; Pandey; Kundu, 2021).

O Zoneamento de Risco de Incêndios Florestais (ZRIF) é um dos métodos adotados para a predição de incêndios florestais (Eugenio, 2017; Juvanol, 2017; Ramalho *et al.*, 2021; Torres *et al.*, 2014; Yang; Jin; Zhou, 2021). O ZRIF pode ser construído com base em técnicas de geoprocessamento e inteligência artificial (IA) que utilizam variáveis antrópicas, topográficas e climáticas, a fim de gerar mapas indicativos das áreas com maior risco à ocorrência e propagação do fogo.

Associado ao ZRIF, a indicação de áreas prioritárias para a prevenção dos incêndios devido a presença de vegetações mais sensíveis, dentro de um Bioma considerado independente do fogo, configura estratégia eficiente para administrar o uso do fogo na Caatinga. De acordo com o MapBiomas (2021), o Bioma perdeu cerca

de 10 % das áreas de vegetação natural entre os anos de 1985 e 2020, sendo uma das principais causas, o avanço da agropecuária. Esta atividade, corresponde a uma das principais impulsionadoras do uso do fogo no Bioma, que quando utilizado de forma e em época inadequada, ocasionam grandes incêndios e perda de formações florestais.

No Brasil, apesar da aprovação do Código Florestal em 2012 (Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012), que legisla sobre o uso do fogo, controle aos incêndios e a necessidade do estabelecimento de políticas referentes ao manejo do fogo, apenas em 2024 foi instituída a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (Lei Federal nº 14.944, de 31 de julho de 2024), que objetiva entre outras frentes, a prevenção aos incêndios florestais por meio de planos de manejo com priorização de áreas de conservação. Assim, o zoneamento de risco de incêndio, associado a definição de regiões prioritárias de prevenção, constituem importantes ferramentas de gestão para o território nacional, sobretudo em ambientes sensíveis e não adaptados ao fogo acometidos pelas alterações climáticas e atividades antrópicas.

Neste sentido, com a hipótese de que o Bioma Caatinga tem se tornado mais suscetível aos incêndios florestais devido às mudanças climáticas e atividades antrópicas, e que o uso de ferramentas de geotecnologia pode auxiliar a prever e mitigar os efeitos do fogo sob este ecossistema, esta pesquisa foi subdividida em dois capítulos. No Capítulo 1, foi analisada a ocorrência dos incêndios florestais na Caatinga em uma escala temporal de 10 anos, associando a esses eventos às características ambientais capazes de favorecer ou reduzir o risco. No Capítulo 2, essas características foram utilizadas para a modelagem do risco aos incêndios florestais, resultando em um mapa de zoneamento de risco, base para a identificação de áreas prioritárias para a prevenção dos incêndios com ênfase na conservação do Bioma Caatinga.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences**, v. 363, p. 1779-1785, 2008.

BARBIERI, A. F. Mudanças climáticas, mobilidade populacional e cenários de vulnerabilidade para o Brasil. **Revista Interdisciplinar de Mobilidade Humana**, v. 19, n. 36, p. 95-112, 2011.

BHADORIA, R. S.; PANDEY, M. K.; KUNDU, P. RVFR: Random vector forest regression model for integrated & enhanced approach in forest fires predictions. **Ecological Informatics**, v. 66, p. 101471, 2021.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

EUGENIO, F. C. **Análise de risco de incêndios em florestas plantadas**. 2017. 163 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

FERNANDES, L. C. **Modelagem de risco de incêndios florestais utilizando redes neurais artificiais aplicada às regiões metropolitanas**. 2019. 948 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

FONSECA, M. G. *et al.* Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2931– 2946, 2019.

GARIGLIO, M. A. *et al.* **O Papel do Manejo Florestal Sustentável**. Serviço Florestal ed. Brasília, DF: [s.n.], 2010.

GIULIETTI, A. M. *et al.* Diagnóstico da Floresta Nativa do Bioma Caatinga. In: SILVA, J. M. C. *et al.* (Orgs.). **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004. p. 48-90.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Sumário para formuladores de políticas. **IPCC**, p. 28, 2018.

JESUS, J. B. *et al.* Análise da incidência temporal, espacial e de tendência de fogo nos Biomas e unidades de conservação do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 176–191, 2019.

JUVANHOL, R. S. **Aprendizado de máquina na modelagem de incêndios florestais no estado do Espírito Santo**. 2017. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

_____. Gis and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. 1-18, 2021.

KOUTROULIS, A. G. Dryland changes under different levels of global warming. **Science of the Total Environment**, v. 655, p. 482–511, 2019.

LEAL, I. R. *et al.* Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 139-146, 2005.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. Ecologia e conservação da caatinga. **Ecologia e Conservação da Caatinga Recife**: Ed. Universitária da UFPE, v. 1, n. 2. ed., p. 822, 2003.

LEITE, C. C. S. de S. *et al.* Análise dos incêndios ocorridos no Parque Nacional da Chapada Diamantina - Bahia em 2008 e 2015 com suporte em índices espectrais de vegetação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p. 1127-1141, 2017.

LUCAS, F. M. F. **Panorama dos incêndios florestais em áreas protegidas brasileiras**. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2020.

MAPBIOMAS, 2021. **Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. Disponível em:
<https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users%2FmapBiomass%2Fuser-toolkit&scriptPath=users%2FmapBiomass%2Fuser-toolkit%3AmapBiomass-user-toolkit-lulc.js>. Acesso em: 12 out. 2022.

MIRANDA, R.; SILVA, R. G; JUVANHOL, R. S. Forest fire action on vegetation from the perspective of trend analysis in future climate change scenarios for a Brazilian savanna region. **Ecological Engineering**, v. 175, n. July 2021, p. 106488, 2022.

MORO, M. F. *et al.* A phytogeographical metaanalysis of the semiarid caatinga domain in Brazil. **Botanical Review**, v. 82, n. 2, p. 91-148, 2016.

MYERS, R. L. Convivendo com o fogo - Manutenção dos ecossistemas & subsistência com o manejo integrado do fogo. **The Nature Conservancy**, v. 850, p. 668-0827, 2006.

PIVELLO, V. R. *et al.* Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**. v. 19, 233–255, 2021.

RAMALHO, A. H. C. *et al.* Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113-122, 2021.

RIBEIRO, K. *et al.* Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 1048-1057, 2016.

SÁ, C. S. B. de *et al.* Salinization causes abrupt reduction in soil nematode abundance in the Caatinga area of the Submediterranean San Francisco Valley, Brazilian semiarid region. **Pedobiologia**, v. 85-86, p. 2017–2022, 2021.

SANTANA, R. O.; DELGADO, R. C.; SCHIAVETTI, A. Modeling susceptibility to forest fires in the Central Corridor of the Atlantic Forest using the frequency ratio method. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113-343, 2021.

SILVA, P. F. da *et al.* Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017.

SILVA, J. L. B. *et al.* Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, 2020.

SILVA JUNIOR, J. A.; PACHECO, A. da P. Avaliação de incêndio em ambiente de Caatinga a partir de imagens Landsat-8, índice de vegetação realçado e análise por componentes principais. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 417-439, 2021.

SILVA, P. *et al.* Future projections of fire occurrence in Brazil using EC-Earth Climate Model. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 288-297, 2016.

TORRES, F. T. P. *et al.* Mapeamento da suscetibilidade a ocorrência de incêndios em vegetação na área urbana de Ubá - MG. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 811-817, 2014.

UNEP, U. N. E. P. **Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires**. Rapid Resp ed. Nairobi: [s.n.], 2022.

VIEIRA, G. dos S. **Análise espaço-temporal do fogo no Bioma Caatinga**. 2021. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, 2021.

WERNECK, F. P. The diversification of eastern South American open vegetation biomes: Historical biogeography and perspectives. **Quaternary Science Reviews**, v. 30, n. 13-14, p. 1630-1648, 2011.

YANG, X.; JIN, X.; ZHOU, Y. Wildfire risk assessment and zoning by integrating maxent and GIS in Hunan Province, China. **Forests**, v. 12, n. 10, 2021.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Identificar áreas prioritárias para prevenção de incêndios florestais na Caatinga, a partir de ferramentas de geotecnologia e modelagem *fuzzy*, visando à preservação da biodiversidade e mitigação dos riscos ambientais.

2.2 Objetivos específicos

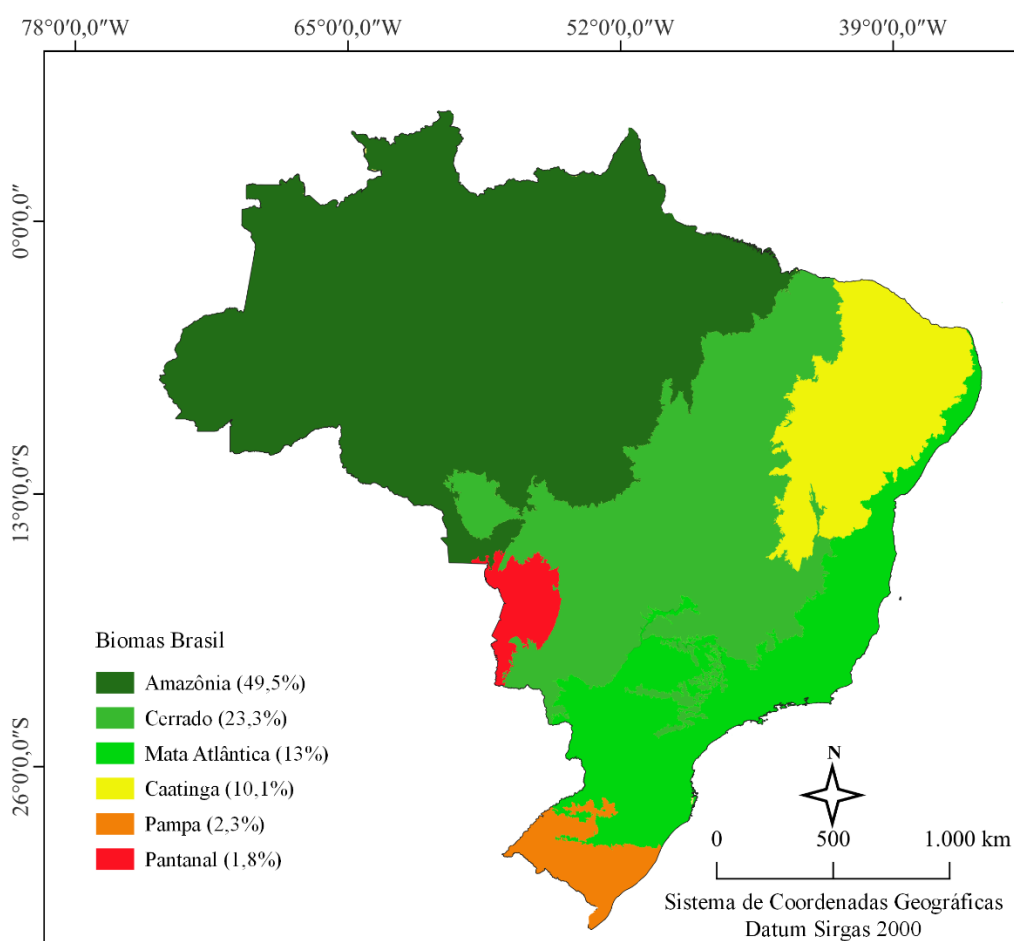
- a) Caracterizar os incêndios florestais na Caatinga, conforme características ambientais;
- b) Gerar mapa de risco de incêndios florestais para o Bioma Caatinga de acordo com as variáveis ambientais e socioeconômica;
- c) Validar o modelo gerado para previsão dos incêndios florestais na Caatinga;
- d) Identificar regiões prioritárias para prevenção dos incêndios florestais no Bioma Caatinga, com ênfase na conservação da biodiversidade.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Bioma Caatinga

Bioma é conceituado como uma área de conjunto de vidas com ecologia e diversidade biológica próprias, onde há uniformidade em macroclima, fitofisionomias ou formação vegetal e fauna, além de condições geoclimáticas similares, como altitude, solo, regimes de alagamentos, salinidade e fogo (Coutinho, 2006; IBGE, 2018). Apesar das características semelhantes que o compõem, há diversidade regional dentro de um Bioma, o que permite identificar vários tipos de vegetação em um único ambiente. No Brasil, a grande extensão em território e riqueza em características ambientais, permite considerar seis Biomas: Amazônia, Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Pantanal e Pampa (Figura 1).

Figura 1 – Biomas brasileiros



Fonte: IBGE (2012), adaptado pela autora.

O Bioma Caatinga, quarto maior Bioma do território nacional, ocupa 862.818 km, equivalente a 10,1% do território brasileiro (IBGE, 2012), abrange os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, a maior parte da Paraíba e Pernambuco, sudeste do Piauí, oeste de Alagoas e Sergipe, região norte e central da Bahia e uma faixa norte de Minas Gerais (Gariglio *et al.*, 2010; Leal *et al.*, 2005), compreendendo quase que a totalidade do semiárido brasileiro. Este Bioma, apresenta vários tipos de vegetação, sendo o mais comum dominado por árvores baixas, caducifólias, frequentemente espinhosos, além de plantas como cactos e eufórbias. Ademais, a perda de folhas na estação seca confere aspecto claro à vegetação, que por sua vez foi denominada pelos povos indígenas como “mata branca”, significado de Caatinga em tupi-guarani (Peixoto; Luz; Brito, 2016).

A disponibilidade hídrica é um fator limitante para o Bioma Caatinga (Giulietti *et al.*, 2004). A região é caracterizada por altas temperaturas, evapotranspiração elevada e variabilidade na distribuição hídrica, com períodos extensos de seca, chuvas pouco distribuídas no espaço e no tempo, de alta intensidade e curta duração (Silva *et al.*, 2020). Esta irregularidade pluviométrica, associada às características geológicas, impossibilitam a manutenção dos rios perenes e conferem à região a maior presença de rede de rios temporários se comparadas aos permanentes, os quais são essenciais para prover água durante todo o ano para fauna, flora e população local (Giulietti *et al.*, 2004). O maior exemplo de rio perene na região é o Rio São Francisco, que nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais e corta o nordeste brasileiro (Cirilo, 2008), levando água a 521 municípios em cinco estados do nordeste e sustentando seis usinas hidrelétricas (Peixoto; Luz; Brito, 2016).

Além da problemática da seca, a Caatinga vem sofrendo ao longo da história, um processo de degradação severa, ocasionado principalmente por ações antrópicas, como extração ilegal de madeira, extração mineral e vegetal e alteração do uso do solo para inclusão de atividade agrícola e pecuária. Esses fatores implicam em altos índices de desmatamento e fragmentação da vegetação do Bioma, o que representa atualmente cerca de 50% da cobertura vegetal original (Antongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018; Menezes *et al.*, 2012).

Apesar das adversidades, o Bioma contém grandes fragmentos de vegetação capazes de conservar a biodiversidade local (Antongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018), com biota extremamente diversa e espécies totalmente adaptadas ao clima da região. Estas espécies compõem formações vegetacionais influenciadas pelo relevo da região e permitem que o Bioma mantenha uma estrutura capaz de responder à

disponibilidade de água e nutrientes do solo (Gariglio *et al.*, 2010; Peixoto; Luz; Brito, 2016).

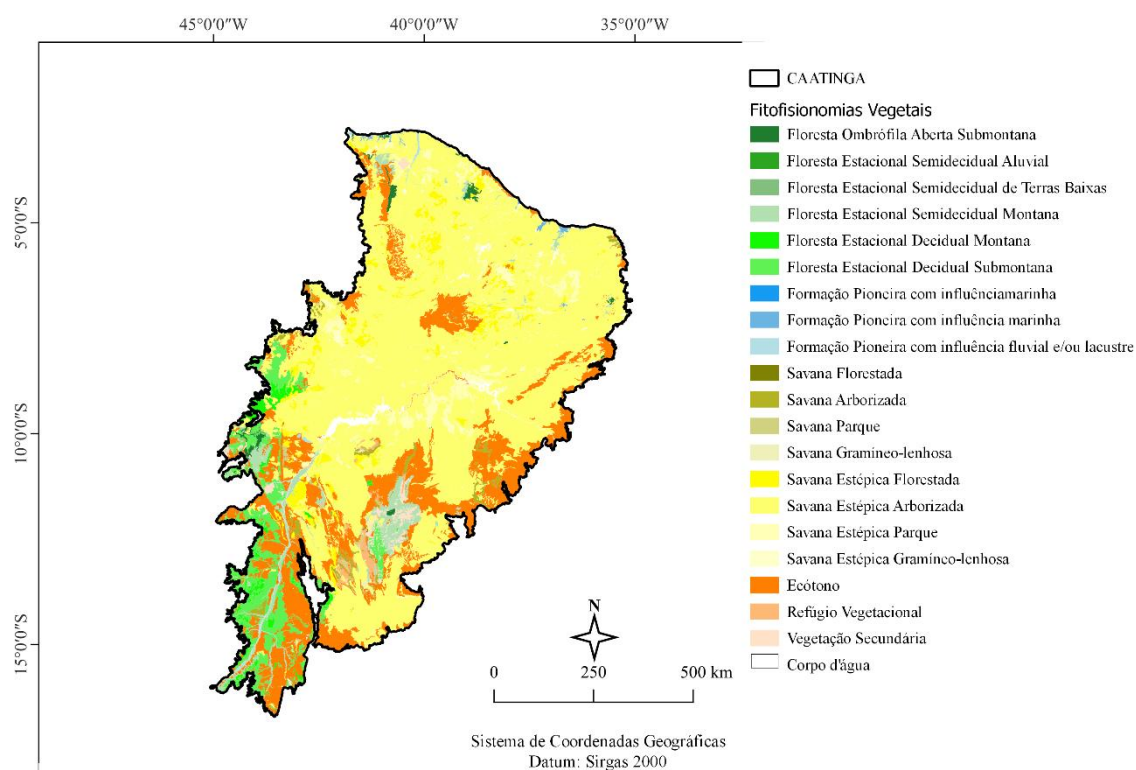
De acordo com Leal; Tabarelli e Silva (2003), vários autores classificaram a vegetação da Caatinga de acordo diferentes critérios. A classificação de Veloso (1964) por exemplo, descreve como “formação caatinga”, que engloba espécies arbustivas e arbóreas decíduas e espinhosas, distribuídas de maneira densa ou espalhada sobre o território, além de suculentas; e “formação florestal”, que apresenta vegetação arbórea decídua com árvores perenifólias espalhadas. Portanto, de acordo o aspecto vegetacional, o Bioma Caatinga apresenta complexo fisionômico distribuído em mosaico (Coutinho, 2006), onde são encontradas fitofisionomias que vão desde a formação de savana estépica (de predominância da região) até florestas estacionais semidecíduais, decíduais e ecótonos, com grande influência dos aspectos da caatinga tradicional (IBGE, 2018).

3.1.1 Fitofisionomias da Caatinga

A classificação das fitofisionomias brasileiras é descrita na Classificação da Vegetação Brasileira (adaptada a um sistema universal) (Veloso; Rangel Filho; Lima, 1991) e no Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 1992, 2012). Associado às descrições, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponibiliza dados vetoriais referentes à classificação de vegetação em todo o território brasileiro, sendo a versão mais atualizada datada para o ano de 2021, com escala de 1:250.000 (IBGE, 2022). Nesse contexto, a Figura 2 ilustra todas as fitofisionomias do Bioma Caatinga, bem como a Tabela 1 apresenta as áreas em quilômetros quadrados (km²) e a representação em percentual (%) de cada um dos tipos vegetacionais para o Bioma.

Em tempo, é importante destacar, que algumas fitofisionomias apresentam subclassificações que se distinguem de acordo a latitude e a altitude em que se localizam, podendo ser denominadas como Aluvial, Terras Baixas, Submontana e Montana. Na Caatinga, a elevação do terreno varia entre 0 e 1.866 m, o que favorece a formação de algumas dessas formações de vegetação.

Figura 2 – Fitofisionomias vegetais do Bioma Caatinga



Fonte: IBGE (2012), adaptado pela autora.

a) Floresta Ombrófila Aberta

Fitofisionomia característica de área de transição entre floresta amazônica e extra-amazônica, as Florestas Ombrófilas Abertas receberam esta denominação devido à presença de elementos como palmeiras, bambus e cipós que tornam o dossel mais aberto, quando comparados às Florestas Ombrófilas Densas. Apesar de serem originárias do ambiente amazônico, esta fitofisionomia encontra-se em ambientes mais quentes, com gradientes climáticos que superam os 60 dias secos anualmente (IBGE, 2012).

De modo geral, as Florestas Ombrófilas Abertas podem ser classificadas em Submontana, Aluvial e de Terras Baixas, no entanto, de acordo o IBGE (2022), no Bioma Caatinga encontra-se apenas uma delas, a Floresta Ombrófila Aberta Submontana.

Tabela 1 – Áreas representativas das fitofisionomias vegetais do Bioma Caatinga

Fitofisionomia	Área (km²)	%
Floresta Ombrófila Aberta Submontana	4.981,14	0,58
Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	0,02	0,00
Floresta Estacional Semidecidual de Terras Baixas	50,93	0,01
Floresta Estacional Semidecidual Montana	24.570,78	2,86
Floresta Estacional Decidual Montana	12.028,27	1,40
Floresta Estacional Decidual Submontana	48.210,84	5,60
Formação Pioneira com influência marinha	1.181,91	0,14
Formação Pioneira com influência fluviomarinha	1.788,94	0,21
Formação Pioneira com influência fluvial e/ou lacustre	1.703,26	0,20
Savana Florestada	100,57	0,01
Savana Arborizada	11.392,70	1,32
Savana Parque	1.479,22	0,17
Savana Gramíneo-lenhosa	801,94	0,09
Savana Estépica Florestada	33.352,90	3,88
Savana Estépica Arborizada	514.513,01	59,65
Savana Estépica Parque	29.012,16	3,37
Savana Estépica Gramíneo-lenhosa	848,26	0,10
Ecótono	152.000,84	17,67
Refúgio Vegetacional	5.210,25	0,61
Vegetação Secundária	7.416,43	0,86

*Somatório dos percentuais correspondentes às fitofisionomias não alcança os 100 % devido as áreas de corpos d'água que não estão apresentados na tabela. A Caatinga apresenta 9.529,50 km² de corpo hídrico, correspondendo a 1,11 % do território do Bioma.

Fonte: IBGE (2012), adaptado pela autora.

A Floresta Ombrófila Aberta Submontana ocupa 4.981,14 km² (0,58%) do território da Caatinga, distribuída em pontos isolados, localizados nos estados do Ceará, sul do Piauí na divisa com o Bioma Cerrado, na região central da Bahia e no leste da Paraíba. Para o Bioma, esta vegetação aberta com palmeiras, constitui uma comunidade secundária denominada por “florestas de babaçu”, devido a grande concentração da espécie *Attalea speciosa* (IBGE, 2012), ou brejos de altitude, devido a umidade e elevação do terreno onde se encontram (Leal; Tabarelli; Silva, 2003).

b) Floresta Estacional Semidecidual

A Floresta Estacional Semidecidual, também conhecida como Floresta Tropical Semicaducifólia, apresenta de acordo com o IBGE (2012), conceituação ecológica determinada em função da ocorrência do clima estacional que estabelece a semidecidualidade dos indivíduos que formam a floresta. Em regiões tropicais, a perda da folhagem acentua-se durante o período de seca hiberna, enquanto em zonas

subtropicais o inverno rígido (temperaturas abaixo de 15 ° C), determinam o repouso fisiológico e queda parcial das folhas.

Os indivíduos que compõem esta fitofisionomia, apresentam características adaptativas contra os períodos de estiagem, desprendendo da folhagem para a redução do gasto energético e renovando-as no período chuvoso. O percentual das árvores caducifólias no conjunto florestal encontra-se entre 20 e 50% (Veloso; Rangel Filho; Lima, 1991).

Na Caatinga, esta formação ocupa 24.621,73 km² (2,87 %), localizada majoritariamente no estado da Bahia, com alguns fragmentos nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Piauí e Minas Gerais. Dentre as subdivisões da fitofisionomia de acordo a altitude, o Bioma apresenta 0,02 km² de Floresta Estacional Semidecidual Aluvial, 50,93 km² de Floresta Estacional Semidecidual de Terras Baixas e 24.570,78 km² de Floresta Estacional Semidecidual Montana.

c) Floresta Estacional Decidual

A Floresta Estacional Decidual ou Floresta Tropical Caducifólia encontra-se distribuída pelos quatro quadrantes do Brasil, sendo formada por mais de 50% dos indivíduos caducifólios, ou seja, que perdem as folhagens em épocas desfavoráveis. Esta fitofisionomia, assim como a subcaducifólia, apresentam-se em duas situações distintas: em zona tropical, com período de chuva seguido de período seco; e em zona subtropical, que apesar de não apresentar período seco, passa por inverno severo que favorecem o desprendimento das folhas (IBGE, 2012).

Na Caatinga as Florestas Estacionais Decíduas recobrem 60.239,11 km² (7,0 %) do território, onde 12.028,27 km² (1,4 %) corresponde à Floresta Estacional Decidual Montana e 48.210,84 km² (5,6 %) à Floresta Estacional Decidual Submontana, não apresentando as demais classificações altitudinais. No que diz respeito a distribuição, esta tipologia florestal se localiza nos estados do Piauí, Bahia e Minas Gerais, majoritariamente na divisa da Caatinga com o Bioma Cerrado.

Segundo o IBGE (2012), na Floresta Estacional Decidual Submontana encontra-se as maiores disjunções de floresta decidual no país. Na Bahia, por exemplo, esta formação reveste os terrenos calcários da Bacia do Rio Pardo com uma vegetação relativamente alta e conhecida popularmente como “mata de cipó”, onde a maior parte da floresta é envolvida regularmente por lianas (cipós) com folhagens sempre verdes, que conferem ao ambiente uma falsa aparência verde na época de seca.

d) Formações Pioneiras

As Formações Pioneiras, também conhecidas como complexo vegetacional edáfico de primeira ocupação, são todo território localizado ao longo do litoral, bem como em planícies fluviais e ao redor de depressões aluviais. Estas áreas são formadas por terrenos instáveis, devido a deposições de areias marinhas nas praias e restingas, aluviões fluviomarinhas nas embocaduras dos rios e solos ribeirinhos, e cobertos por vegetação de primeira ocupação em constante sucessão (IBGE, 2012).

De acordo a localização e influência que sofrem, estas regiões pioneiras foram classificadas em Formações Pioneiras com influência marinha (restinga), Formações Pioneiras com influência fluviomarinha (mangues e campos salinos) e Formações Pioneiras com influência fluvial (comunidades aluviais). Para um Bioma com pouca rede de abastecimento hídrico, esta fitofisionomia encontra-se em pequenos percentuais. A restinga e os mangues, localizados no litoral dos estados do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, ocupam 1.181,91 km² (0,14 %) e 1.788,94 km² (0,21 %) do território da Caatinga, respectivamente, enquanto as comunidades aluviais, localizadas principalmente às margens do Rio São Francisco, ocupam 1.703,26 km² (0,20 %) do Bioma.

e) Savana

A Savana, vegetação típica do Cerrado, é também conhecida na região nordeste como tabuleiro, agreste e chapada. Esta fitofisionomia é conceituada como uma vegetação xeromorfa, que ocorre sob diferentes tipos de clima, sendo subdividida em quatro subgrupos de formação: Florestada, Arborizada, Parque e Gramíneo-lenhosa (IBGE, 2012).

A Savana Florestada, ou Cerradão, é composta por uma vegetação tortuosa, com ramificações irregulares, providos de ritidoma com órgãos de reserva subterrâneos ou xilopódios. Na Caatinga, esta fitofisionomia ocupa pequena extensão, 100,57 km² (0,01 %), localizada pontualmente na região da Chapada Diamantina, Bahia.

A Savana Arborizada ou Campo Cerrado é caracterizada por ser de formação natural ou antropizada, composta por árvores espaçadas e graminóides contínuos, em que anualmente são acometidas pela passagem do fogo (IBGE, 2012). No Bioma Caatinga, esta subformação está dispersa na região que compreende o estado da Bahia e algumas áreas pontuais do Piauí, Rio Grande do Norte e norte de Minas Gerais. Em extensão, ocupa 11.392,70 km² (1,37 %) do Bioma.

De origem natural ou antrópica, a Savana Parque ou Campo Sujo, é encontrada em toda extensão do território brasileiro e constituído essencialmente por famílias de graminóides (IBGE, 2012). Na Caatinga, encontra-se localizada nos estados da Bahia, Piauí e Minas Gerais, ocupando 1.479,22 km² (0,17 %) do território.

Por fim, a subformação Savana Gramíneo-lenhosa, também conhecida como Campo Limpo, tem por característica a presença de gramíneas entremeadas por plantas lenhosas de pequeno porte. Na Caatinga ocupa 801,94 km² (0,09 %) do Bioma, localizada no estado da Bahia.

f) Savana Estépica

A Savana Estépica, vegetação predominante e representativa do Bioma Caatinga, apresenta tipologias vegetais campestres com estrato lenhoso decidual e espinhoso, onde o clima apresenta dois períodos secos anuais: um marcado por longos períodos de secas, seguidos por chuvas intermitentes e outro com curto tempo de déficit hídrico seguidos por chuvas torrenciais que podem faltar durar anos (Veloso; Rangel Filho; Lima, 1991).

A Savana Estépica ocupa 67 % do território da Caatinga, totalizando 577.726,33 km². No entanto, esta classificação baseia-se na variedade fisionômica (Leal; Tabarelli; Silva, 2003), e assim como a Savana, é classificada em quatro subgrupos de formação: Florestada, Arborizada, Parque e Gramíneo-lenhosa.

A Savana Estépica Florestada, é caracterizada por vegetação arbórea decídua pouco adensada, com troncos grossos, bastante ramificados e geralmente provido de espinhos e/ou acúleos e estrato inferior gramíneo-lenhoso geralmente descontínuo e de pouca expressão fisionômica (IBGE, 2012; Veloso; Rangel Filho; Lima, 1991). Ocupa cerca de 33.352,90 km² (3,88 %) do território da Caatinga e está distribuída em quase todos os estados do Bioma, exceto Sergipe e norte de Minas Gerais.

A Savana Estépica Arborizada, recobre todos os estados que compõem a Caatinga e corresponde a 514.513,01 km² (59,65 %), sendo a de maior representatividade e ocupação do Bioma. Este subgrupo de formação vegetal está estruturado em dois estratos de bastante relevância fitofisionômica: um arbustivo-arbóreo superior, com vegetação esparsada; e outro inferior herbáceo (IBGE, 2012).

A Savana Estépica Parque apresenta características típicas, com arbustos e árvores de pequeno porte, geralmente de mesma espécie, distribuídos de maneira espaçada, sobre um tapete denso de plantas herbáceas e gramíneas, geralmente em pequenas depressões recobertas por solo de baixa drenagem, ocasionando

alagamentos em períodos de chuva (IBGE, 2012). Na Caatinga, esta formação se localiza nos estados da Bahia, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí, ocupando 29.012,16 km² (3,37%) do Bioma.

Por fim, a Savana Estépica Gramíneo-lenhosa, também conhecida como campo-espinhoso, é a subformação de menor ocorrência na Caatinga, correspondendo a 848,26 km² (0,10 %), localizada nos estados do Piauí e Ceará, e caracterizada por apresentar um extenso campo gramíneo com plantas lenhosas espinhosas de pequeno porte, distribuídas pontualmente sobre a área (IBGE, 2012).

g) Ecótono

Ecótono compreende as áreas de contato ou transição entre tipos de vegetação, onde ocorrem duas ou mais fitofisionomias ecológicas. Esta mistura florística entre tipos de vegetação é de difícil identificação por meio de fotointerpretação, devido a estrutura fitofisionômica formada por conjunto homogêneo e uniforme com presença de indivíduos isolados que se misturam à floresta. Dessa maneira, faz-se necessário um levantamento florístico de cada região, pra delimitar as áreas de ecótono (IBGE, 2012).

Na região da Caatinga são identificadas áreas de transição entre vegetações que ocupam 152.000,84 km² (17,87 %) do Bioma, distribuídas por todos os estados que o compõem.

h) Refúgio Vegetacional

O Refúgio Vegetacional ou comunidades relíquias são todo e qualquer tipo de vegetação distinta nos aspectos florísticos e ecológicos dominantes da região fitoecológica. Estas áreas geralmente apresentam vegetação endêmica que persiste em situações específicas, como é o caso das comunidades localizadas em altitudes superiores a 1.800 m (IBGE, 2012). Na Caatinga, as vegetações relíquias são encontradas no estado da Bahia, ocupando 5210,25 km² (0,61 %) do Bioma.

i) Vegetação Secundária

O IBGE (2012) descreve Vegetação Secundária como sendo áreas onde houve intervenção antrópica, seja ela com a finalidade mineradora, agrícola ou pecuária, descaracterizando uma vegetação primária. Quando abandonadas, essas áreas passam por longo processo de regeneração, surgindo assim uma vegetação secundária que reage de maneira distinta da existente inicialmente, porém com parâmetros ecológicos uniformes e características semelhantes ao ambiente anterior.

Os dados disponibilizados pelo IBGE (2022), apresentam para o Bioma Caatinga uma área de 7.416,43 km² (0,86 %) de Vegetação Secundária, indicando regiões de exploração humana que foram abandonadas e tiveram a capacidade de regeneração. Estas áreas estão distribuídas pelos estados da Bahia, Piauí e Ceará.

j) Áreas antropizadas

Os processos antropogênicos ocorridos na Caatinga, como desmatamento e alteração do uso e ocupação do solo, proporcionaram uma mudança na estrutura das fitofisionomias encontradas no Bioma. Estudos sobre a fragmentação da vegetação local, indicam que houve redução de 50 % da cobertura vegetal, sendo que o remanescente encontra-se distribuído de forma desigual pela paisagem (Antongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018). Estes autores informam uma perda severa de habitat na porção leste, mais próxima à costa, no extremo sul e porção central da Caatinga, onde são encontrados pequenos fragmentos de vegetação remanescente, e no Sul, onde algumas áreas foram totalmente substituídas por matrizes antrópicas.

Os dados mais recentes disponibilizados pelo IBGE (2022) permitem delimitar as regiões onde as atividades agrícola e pecuária sobrepuseram as áreas de vegetação natural na Caatinga. A pecuária e a extração de madeira, por exemplo, são as atividades que mais modificam o estado de conservação da vegetação (Antongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018). Desse modo, a agricultura representa 284.919,92 km² (33,02 %) e as áreas de pastagem ocupam 69.831,55 km² (8,10%) do território da Caatinga, ocasionando uma redução superior a 50% das áreas ocupadas pela Savana Estépica Florestada e Floresta Estacional Decidual Submontana.

Apesar da drástica redução na vegetação, estudos indicam que a Caatinga ainda possui grandes fragmentos nativos com grande potencial ecológico em abrigar populações das mais diversas espécies, inclusive as mais sensíveis (Antongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018). Em contrapartida, o histórico de alteração antrópica e uso excessivo do solo favorecem a extinção da dinâmica espacial da vegetação, o que têm promovido alterações no microclima local e déficit hídrico ainda mais acentuado (Silva *et al.*, 2020), além de potencializar as condições significativas à desertificação da Caatinga e propiciar a ocorrência dos eventos de incêndios florestais (Vieira, 2021).

3.2 Incêndios florestais na Caatinga

Segundo o MapBiomas (2023), apesar de apresentar baixa frequência de incêndios em uma mesma área, a Caatinga é o terceiro Bioma brasileiro que mais queimou entre os anos de 1985 e 2022, com 12,2 % do território queimado, antecedido pelo Cerrado (39,9 %) e Amazônia (19,2 %). Em média, 4.554 km² são queimados na Caatinga ao ano, com ocorrência concentrada entre os meses de agosto e dezembro, e pico no mês de outubro. Considerando uma escala espacial, os estados do Piauí, Bahia e Ceará representam 71 % do total queimado no Bioma, estando a Bahia e o Piauí entre os seis estados com maiores áreas queimadas acumuladas no país, 120.545 e 104.899 km², respectivamente.

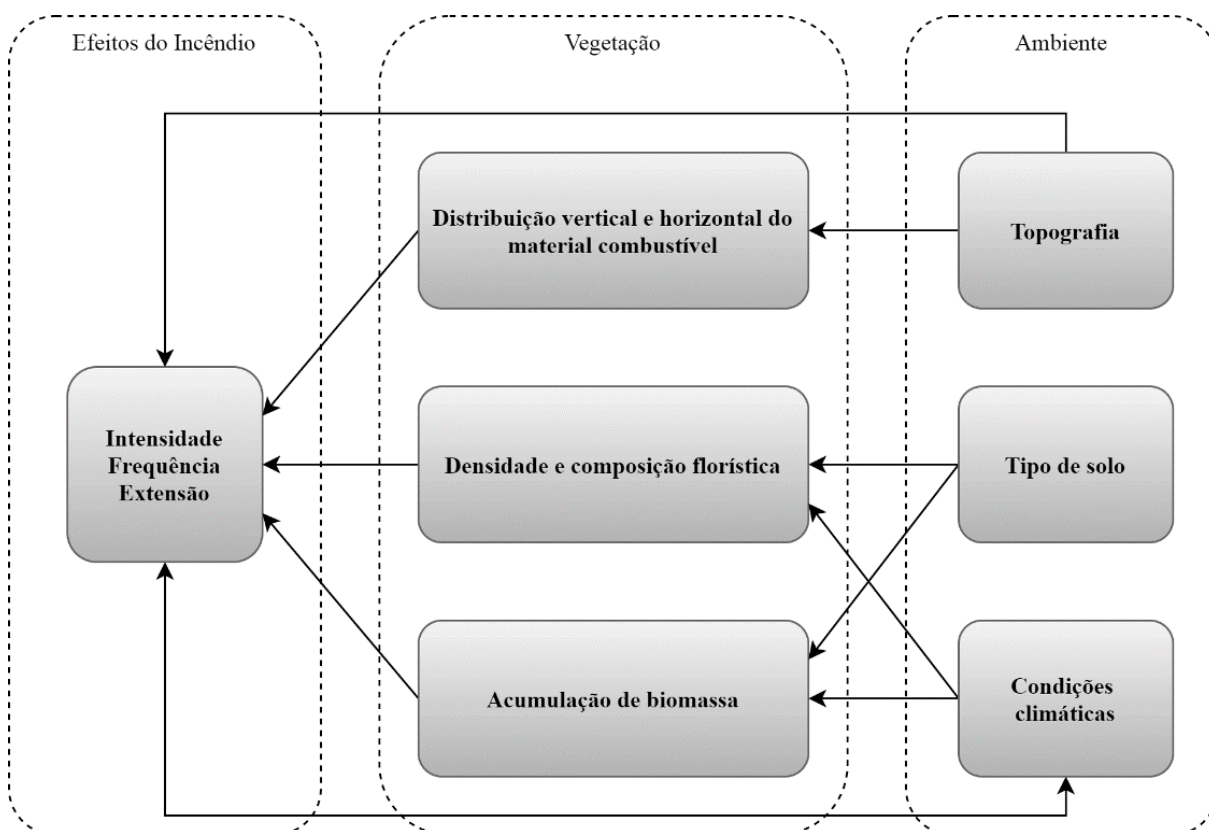
O período crítico da seca na Caatinga, que compreende os meses de julho a dezembro, infere diretamente no aumento dos focos de calor e queimadas no Bioma. Durante este período, a vegetação da Caatinga passa pelo efeito da caducifolia, onde a perda da umidade e desprendimento das folhas disponibilizam material combustível de fácil ignição e propagação do fogo (Alves *et al.*, 2021).

Dentre os tipos de vegetação mais acometidos pelos incêndios na Caatinga, as formações naturais são as predominantes (85 %), sendo a formação savânica a de maior representatividade (79 %) (MapBiomas, 2023). Entretanto, as causas associadas aos incêndios florestais estão diretamente ligadas às atividades antrópicas, principalmente devido ao manejo de áreas agrossilvipastoris (Atongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018).

3.3 Características ambientais que impulsionam a ocorrência do fogo

A ocorrência dos incêndios florestais tem ligação direta com as características ambientais locais. As condições climáticas, vegetacionais e socioeconômicas atuam sobre os componentes do triângulo do fogo (combustível, oxigênio e calor), bem como a interação de todos eles, causam efeitos direto ou indiretos sobre a ocorrência, propagação, intensidade, frequência e extensão dos incêndios florestais (Figura 3).

Figura 3 – Diagrama esquemático, ilustrando interações entre as características do fogo, da vegetação e do ambiente



Fonte: Schumacher; Dick, 2018, adaptado pela autora.

Os efeitos e influência que cada fator terá sobre a ocorrência do fogo pode variar conforme a localização e estação do ano (Schumacher; Dick, 2018). No mundo, diversas combinações de variáveis ambientais são testadas para a modelagem de risco de incêndios, onde variáveis como altitude (Barros-Rosa *et al.*, 2022; Bui *et al.*, 2017), orientação do relevo (Bui *et al.*, 2017), temperatura (Arpaci *et al.*, 2014); (Barros-Rosa *et al.*, 2022; Dong *et al.*, 2022; Eugenio *et al.*, 2016); (Kayet *et al.*, 2020; Pourtaghi; Pourghasemi; Rossi, 2015), precipitação (Chen *et al.*, 2015; Fernandes, 2019) e vegetação (Duarte, 2022); (Kayet *et al.*, 2020; Pourtaghi; Pourghasemi; Rossi, 2015; Santana; Delgado; Schiavetti, 2021) além de variáveis socioeconômicas (Juvanhol, 2017; Bui *et al.*, 2017; Cruz *et al.*, 2022; Fernandes, 2019) (densidade demográfica, proximidade às estradas, comunidades e cidades), são consideradas de alta capacidade preditiva dos modelos.

Para o Bioma Caatinga, considerando a especificidade climática e de vegetação, além da amplitude referente às características topográficas (relevo) e interferência humana sobre o ambiente, são consideradas para a modelagem do risco de incêndio as variáveis de altitude, declividade, orientação do relevo, temperatura,

precipitação, uso e ocupação da terra (vegetação), bem como a proximidade às estradas (Silva; Juvanhhol, Miranda, 2022).

3.3.1 Variáveis topográficas

A topografia diz respeito a descrição de toda a superfície da terra (Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020), que diferentemente das demais características do ambiente, compreende fatores que dificilmente serão modificados ao longo do tempo, mas que influenciam diretamente a umidade e distribuição do material combustível (Schumacher; Dick, 2018). Nos estudos sobre incêndios florestais, os efeitos da topografia podem ser analisados por meio dos três fatores básicos: altitude, declividade do terreno e orientação do relevo (Soares; Batista; Tetto, 2017).

A altitude ou elevação é descrita em metros e apresenta influência sobre a velocidade dos ventos, teor de oxigênio do ar e temperatura do ambiente. Regiões localizadas em altitudes mais elevadas têm ar mais rarefeito e temperaturas mais baixas, o que dificulta a propagação do fogo (Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020; Soares; Batista; Tetto, 2017). Há também relatos de maiores índices pluviométricos em elevações mais altas, o que ocasionam incêndios de mais baixa severidade (Adab; Devi; Karim, 2013; Chuvieco; Congalton, 1989).

A declividade ou inclinação do terreno é um indicador de mudança de elevação, fazendo com que cristas e declives sejam mais favoráveis a ocorrência de incêndios, quando comparados a terrenos planos (Kayet *et al.*, 2020). Desse modo, a declividade está diretamente relacionada a taxa de propagação do fogo, onde aclives acentuados favorecem a propagação devido à proximidade das chamas ao material combustível imediatamente à frente do fogo e renovam o comburente na parte baixa do terreno, mantendo a combustão (Chuvieco; Congalton, 1989; Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020; Schumacher; Dick, 2018).

A orientação do relevo está relacionada com a quantidade de calor recebida nas faces do terreno, o que interfere na umidade do solo, temperatura do ar e taxa de secagem do material combustível (Adab; Devi; Karim, 2013; Chuvieco; Congalton, 1989; Duarte, 2022). No hemisfério sul, as faces do solo voltadas para o norte recebem maior incidência de radiação solar, seguidas pelas faces oeste e leste, fazendo destas orientações mais quente e por consequência mais propensas à ocorrência e propagação dos incêndios (Soares; Batista; Tetto, 2017).

Em complemento às características topográficas, as condições edáficas, como textura, nutrição e disponibilidade hídrica no solo, podem exercer influência sobre o

fogo, principalmente devido ao papel na composição e distribuição da vegetação, além do favorecimento ou não sobre o acúmulo de Biomassa no solo (serapilheira). Sendo a vegetação da floresta o combustível para a ocorrência do fogo, fatores que o afetem apresentam grande influência sobre os incêndios (Barros-Rosa *et al.*, 2022; Pourtaghi; Pourghasemi; Rossi, 2015).

3.3.2 Variáveis climáticas

As variáveis climáticas são reconhecidas como as mais importantes para os incêndios florestais (Arpaci *et al.*, 2014; Qiu *et al.*, 2022), interferindo diretamente desde a prevenção até o combate ao fogo (Schumacher; Dick, 2018). Porventura, as alterações no clima projetadas e apresentadas no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas, 2018), sugerem que irão aumentar a frequência e severidade dos incêndios, principalmente associados ao aumento da temperatura e oscilações nas taxas pluviométricas.

Ao considerar o cenário atual, a influência das variáveis climáticas sobre os incêndios normalmente se manifesta em grandes escalas espaciais, ocorrendo devido ao aumento da concentração de CO₂, que eleva da temperatura do ar, e a alteração da disponibilidade hídrica, que além de reduzir a umidade, altera os padrões de distribuição dos materiais combustíveis no ambiente (He; Shirowzhan; Pettit, 2022).

A temperatura do ar e do material combustível interferem direta e indiretamente a probabilidade de ocorrência e propagação dos incêndios florestais (Soares; Batista; Tetto, 2017). Ou seja, quanto mais elevada a temperatura do ar, maior a temperatura do combustível e consequentemente, maior o risco de incêndios florestais (Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020). Ademais, a temperatura apresenta também uma relação indireta com o fogo devido a influência sobre a altitude (Soares; Batista; Tetto, 2017), evapotranspiração, umidade relativa do ar, ventos e estabilidade atmosférica (Schumacher; Dick, 2018).

A evapotranspiração, que representa a perda de água para a atmosfera por meio da evaporação direta da superfície e da transpiração da vegetação (Stone; Silveira, 1995), corresponde em importante variável para caracterização climática de um Bioma seco. No que diz respeito a influência climática com a vegetação, a evapotranspiração potencial representa o efeito do clima às necessidades hídricas da vegetação (Teixeira, 2018), ou seja, quanto maior o valor da evapotranspiração

potencial, maior a necessidade hídrica do vegetal e consequentemente mais seco e propenso à ocorrência do fogo.

Corroborando aos efeitos da evapotranspiração, o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) corresponde à variável indicativa da redução ou falta de disponibilidade hídrica local no decorrer do tempo (Nascimento; Medeiros, 2022). O PDSI permite indicar a umidade (índices positivos) e a seca (índices negativos) com base na oferta e demanda do balanço hídrico (Ataide, 2021), ou seja, quanto mais negativo os valores deste índice, mais seco está o ambiente que a vegetação está inserida e por consequência, mais baixos são os níveis de precipitação disponibilizados ao combustível vegetal, configurando na ocorrência e propagação do fogo (Sousa, 2023).

Já a precipitação pluviométrica é de ordem inversamente proporcional e significativa à ocorrência dos incêndios, sendo que quanto maior a disponibilidade, menor o risco de ignição e propagação do fogo (He; Shirowzhan; Pettit, 2022). Além da quantidade, a distribuição das chuvas ao longo do ano é fundamental na definição dos períodos de alto risco de incêndios florestais (Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020) e na produção de combustíveis finos que é fator determinante para a recorrência de incêndios em ambientes áridos e semiáridos (Bravo *et al.*, 2010).

Assim, no Brasil, para um Bioma como a Caatinga, caracterizado pelos longos períodos de seca, chuvas irregulares e temperaturas elevadas durante praticamente todo o ano, as variáveis climáticas são imprescindíveis quando se deseja modelar o risco de ocorrência de incêndios florestais.

3.3.3 Variável vegetacional

A vegetação corresponde a um dos componentes principais para a ocorrência do fogo, o combustível. Dessa forma, a reação desta variável frente às demais implica diretamente para uma maior ou menor ocorrência, frequência e severidade dos incêndios florestais. Além disso, a carga de combustível presente no solo exerce influência sobre o microclima local, visto que florestas de maior densidade apresentam ambiente de menor temperatura e maior umidade relativa, o que dificultam o processo de ignição e propagação do fogo (Aquilué *et al.*, 2020).

A disponibilidade de material combustível em áreas de transição de uso da terra, como desmatamento para implantação de atividades agropecuárias, agrega à vegetação um correspondente antrópico que aumentam substancialmente o risco de incêndios florestais (Santana; Delgado; Schiavetti, 2021). Associado a isto, a

disponibilidade de material combustível fino, com grande potencial de ignição, é maior em áreas de pastagem, fazendo com que este tipo de vegetação tenha maiores taxas de propagação e intensidade do fogo (Gomes *et al.*, 2020; Hoffmann *et al.*, 2012). Em áreas naturais, as savanas apresentam maiores potenciais de inflamabilidade, devido à presença de vegetação rasteira (combustível fino), e tolerância ao fogo, associada aos processos de adaptações morfológicas da vegetação (Hoffmann *et al.*, 2012).

A densidade da vegetação, bem como o vigor em que se encontra, contribuem de forma significativa para a ocorrência dos incêndios. Essas características podem ser quantificadas de acordo com índices de vegetação, como o Índice de Área Foliar (IAF) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (Galvêncio *et al.*, 2020; Nascimento, 2020). Enquanto o IAF diz respeito a densidade da vegetação, o NDVI indica o quanto verde e saudável essa vegetação se encontra. Assim, quanto maior o IAF maior a quantidade de material combustível propensos a propagação do fogo, em contrapartida, quanto maior o NDVI (próximo de 1) mais verde e saudável se encontra a vegetação (Nascimento, 2020), porém mais úmida, o que pode inviabilizar a ignição para vegetações de alta densidade.

3.4 Modelagem de risco de incêndios florestais

O risco de incêndio florestal é definido pela probabilidade de um incêndio iniciar e propagar a partir das características ambientais locais e uma fonte de ignição, que pode ser natural ou antrópica (Hardy, 2005). Logo, a modelagem do risco é uma ferramenta imprescindível para a gestão e prevenção dos incêndios florestais, visto que a determinação das localidades de maior probabilidade de ocorrência, permite criar estratégias que sejam capazes de minimizar as ameaças aos recursos naturais, infraestrutura e à vida (Adab; Devi; Karim, 2013).

A modelagem do risco de incêndio está diretamente associada à combinação entre as características ambientais que direcionam a ocorrência do fogo. Neste sentido, o Zoneamento de Risco de Incêndios Florestais (ZRIF) é um dos métodos adotados para modelar os incêndios florestais (Eugenio, 2017; Juvanhol, 2017; Ramalho *et al.*, 2021; Silva, 2023; Torres *et al.*, 2014; Yang; Jin; Zhou, 2021), podendo ser construído com base em técnicas de geoprocessamento e/ou inteligência artificial (IA) que utilizam como entrada no modelo, variáveis vegetacionais, antrópicas, topográficas e climáticas, a fim de delimitar regiões que haja propensão à ocorrência do fogo.

Dentre as diversas técnicas disponíveis para a elaboração de modelos de risco de incêndios florestais, pode-se citar a Lógica *Fuzzy* ou lógica nebulosa. Esta lógica de incertezas pode ser definida como uma ferramenta que permite a normalização das variáveis de entrada do modelo em uma escala que varia de 0 a 1, onde 0 é considerado menos favorável para a ocorrência do evento estudado e 1, o mais favorável (Zadeh, 1965). Esse processo no qual se estabelece um conjunto de regras e uma associação *fuzzy* para cada variável, é conhecido como fuzzificação, tendo por base funções de pertinência que melhor às descrevam de acordo a variável resposta (Fernandes, 2019; Ramalho *et al.*, 2021).

Neste sentido, considerando a natureza de incerteza, a Lógica *Fuzzy* apresenta aplicabilidade em diversas áreas da ciência e setores industriais, com flexibilidade de atuação e funcionabilidade (Watanabe, 2016), isso inclui a modelagem de risco de incêndios, onde a probabilidade de ocorrência não corresponde a uma certeza, visto que onde há condições favoráveis ao fogo apenas se tornará um incêndio se houver ignição.

3.5 Áreas prioritárias para prevenção aos incêndios florestais

A determinação de áreas prioritárias permite zonear regiões vulneráveis ao fogo, bem como possibilita a alocação adequada de recursos para a prevenção dos incêndios florestais (Juvanhol *et al.*, 2021). Além da modelagem do risco de incêndios, que comumente utiliza características ambientais que impulsionam a ocorrência (Eugenio, 2017; Juvanhol, 2017; Ramalho *et al.*, 2021; Silva, 2023; Torres *et al.*, 2014; Yang; Jin; Zhou, 2021), a definição das regiões de maior prioridade para a gestão deve considerar além do estado crítico, ou seja, as áreas onde o fogo é recorrente e que ameacem a conservação da biodiversidade (Brasil, 2009).

Anderson *et al.* (2017), utilizaram os focos de calor e histórico do fogo como ferramenta para definir áreas prioritárias no estado do Acre, fornecendo uma nova perspectiva para regiões onde os incêndios são majoritariamente originados por consequência humana. Assim, incorporar a frequência dos incêndios aos modelos que operam com dados ambientais para definir o risco pode melhorar a espacialização dos resultados e auxiliar de forma assertiva no planejamento e na tomada de decisão.

Além desta perspectiva, considerar vegetações com maior sensibilidade à passagem do fogo e que carecem de atenção para conservação, devem ser prioridade quando se fala em prevenção de incêndios. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2009), aspectos como a proximidade com unidades de conservação,

com presença de espécies raras ou ameaçadas, em áreas de preservação permanente e áreas protegidas, são considerados fundamentais na definição de áreas prioritárias para prevenção do fogo.

A sensibilidade da vegetação, configura presença de espécies sem características adaptativas à passagem do fogo, que sejam capazes de garantir resistência e resiliência para sobreviver e/ou regenerar após os eventos de incêndios (Pivello *et al.*, 2021). Assim, a identificação de áreas prioritárias, em um cenário de risco ao fogo, pode tornar-se uma importante ferramenta na elaboração de uma estratégia para conservação da biodiversidade (Leal; Tabarelli; Silva, 2003), além de compor instrumentos e política pública na proteção a vegetação nativa brasileira (Martins *et al.*, 2022).

4. REFERÊNCIAS

ADAB, H.; DEVI, K.; KARIM, K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. **Nat Hazards**, v. 65, p. 1723–1743, 2013.

ALVES, J. M. B. et al. Um estudo de focos de calor no Bioma Caatinga e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, 513-527, 2021.

ANDERSON, L. O. et al. Utilização de dados orbitais de focos de calor para caracterização de riscos de incêndios florestais e priorização de áreas para a tomada de decisão. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, p. 163-177, 2017.

ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; FONSECA, C. R. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 8, p. 1353–1367, 2018.

AQUILUÉ, N. et al. The Potential of Agricultural Conversion to Shape Forest Fire Regimes in Mediterranean Landscapes. **Ecosystems**, v. 23, n. 1, p. 34–51, 2020.

ARPACI, A. et al. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. **Applied Geography**, v. 53, p. 258–270, 2014.

ATAIDE, L. C. P. **Impactos da variabilidade hidroclimática no semiárido brasileiro**. 2021. 91 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

BARBIERI, A. F. Mudanças climáticas, mobilidade populacional e cenários de vulnerabilidade para o Brasil. **Revista Interdisciplinar de Mobilidade Humana**, v. 19, n. 36, p. 95-112, 2011.

BARROS-ROSA, L. et al. Fire probability mapping and prediction from environmental data: What a comprehensive savanna-forest transition can tell us. **Forest Ecology and Management**, v. 520, p. 120354, 2022.

BRASIL, 2009. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Ibama. **Roteiro Metodológico para a Elaboração de Plano Operativo de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais**. Brasília, 2009.

BRAVO, S. et al. Fire e rainfall relationships in Argentine Chaco savannas. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 10, p. 1319–1323, 2010.

BUI, D. T. et al. A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 32–44, 2017.

CHEN, F. et al. Modeling forest lightning fire occurrence in the Daxinganling Mountains of Northeastern China with MAXENT. **Forests**, v. 6, n. 5, p. 1422–1438, 2015.

CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. **Remote Sens. Environ**, v. 159, n. 29, p. 147–159, 1989.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

COUTINHO, L. M. O conceito de Bioma. **Acta Botânica Brasileira**, v. 20, n. 1, p. 13–23, 2006.

CRUZ, G. A. et al. Modeling the Ignition Risk : Analysis before and after Megafire on Maule Region , Chile. **Applied Sciences**, v. 12, p. 9353, 2022.

DONG, Z. et al. Forest Fire Detection of FY-3D Using Genetic Algorithm and Brightness Temperature Change. **Forests**, v. 13, n. 6, 2022.

DUARTE, M. L. **Previsão da suscetibilidade à incêndios e queimadas utilizando um modelo baseado em inteligência artificial e sistema de inferência fuzzy**. 2022. 131 f. Doutorado (Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista, 2022.

EUGENIO, F. C. **Análise de risco de incêndios em florestas plantadas**. 2017. 163 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

EUGENIO, F. C. et al. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 173, p. 65–71, 2016.

FERNANDES, L. C. **Modelagem de risco de incêndios florestais utilizando redes neurais artificiais aplicada às regiões metropolitanas**. 2019. 948 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais - Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

FONSECA, M. G. et al. Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2931– 2946, 2019.

GALVINCIO, J. D. *et al.* Correlação linear entre a precipitação e o Índice de Área Foliar do Bioma Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.07 p. 3304-3313, 2020.

GARIGLIO, M. A. *et al.* **O Papel do Manejo Florestal Sustentável**. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, DF: [s.n.], 2010.

GIULIETTI, A. M. *et al.* Diagnóstico da Floresta Nativa do Bioma Caatinga. In: SILVA, J. M. C. *et al.* (Orgs.). **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004. p. 48-90.

GOMES, L. *et al.* Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. August 2019, 2020.

HARDY, C. C. Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context. **Forest Ecology and Management**, v. 211, p. 73–82, 2005.

HE, W.; SHIROWZHAN, S.; PETTIT, C. J. GIS and Machine Learning for Analysing Influencing Factors of Bushfires Using 40-Year Spatio-Temporal Bushfire Data. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 11, n. 6, 2022.

HOLFFMAN, W. A. *et al.* Fuels or microclimate? Understanding the drivers of fire feedbacks at savanna–forest boundaries. **Austral Ecology**, v. 37, p. 634-643, 2012.

IBGE. **1º Workshop sobre representação de Biomas - relatório técnico**. , Relatório Técnico., nº 1º. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.

_____. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Downloads**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 18 out. 2022.

_____. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 1ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

_____. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Sumário para formuladores de políticas. **IPCC**, p. 28, 2018.

JUVANHOL, R. S. **Aprendizado de máquina na modelagem de incêndios florestais no estado do Espírito Santo**. 2017. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

_____. GIS and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. 1-18, 2021.

KAYET, N. *et al.* Comparative analysis of multi-criteria probabilistic FR and AHP models for forest fire risk (FFR) mapping in Melghat Tiger Reserve (MTR) forest. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 2, p. 565–579, 2020.

LEAL, I. R. *et al.* Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 139-146, 2005.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. Ecologia e conservação da caatinga. **Ecologia e Conservação da Caatinga Recife**: Ed. Universitária da UFPE, v. 1, n. 2. ed., p. 822, 2003.

LUCAS, F. M. F. **Panorama dos incêndios florestais em áreas protegidas brasileiras**. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2020.

MAPBIOMAS, 2023. **Projeto MapBiomas – Mapeamento das áreas queimadas no Brasil (Coleção 2)**. Disponível em: < https://brasil.mapBiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/12/Fact_Sheet_fogo_2023.pdf >. Acesso em: 14 de jan. 2025.

MARTINS, P. I. *et al.* Prioritising areas for wildfire prevention and post-fire restoration in the Brazilian Pantanal. **Ecological Engineering**. v. 176, 2022.

MENEZES, R. S. C. *et al.* Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Catinga Biome. **Brazilian J. Biol**, v. 72, p. 643–653, 2012.

NASCIMENTO, K. R. P. **Análise da vegetação nativa no núcleo de desertificação Cabrobó: ferramentas para a conservação da Caatinga**. 2020. 148 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

NASCIMENTO, M. B.; MEDEIROS, M. D. Índices de severidade da seca no semiárido, Paraíba. **Mercator**, Fortaleza, v.21, 2022.

PEIXOTO, A. L.; LUZ, J. R. P.; BRITO, M. A. **Conhecendo a biodiversidade**. Brasília: MCTIC, CNP, 2016.

PIVELLO, V. R. *et al.* Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**. v. 19, 233–255, 2021.

POURTAGHI, Z. S.; POURGHASEMI, H. R.; ROSSI, M. Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests , Golestan province , Iran. **Environmental Earth Science**, v. 73, p. 1515–1533, 2015.

QIU, L. *et al.* High-resolution mapping of wildfire drivers in California based on machine learning. **Science of the Total Environment**, v. 833, p. 155155, 2022.

RAMALHO, A. H. C. *et al.* Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113-122, 2021.

SANT'ANNA, C. M.; FIEDLER, N. C.; RAMALHO, A. H. C. Métodos de propagação dos incêndios florestais e fatores influentes. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. M.; RAMALHO, A. H. C. (Org.). **Incêndios Florestais**. Jerônimo Monteiro, ES: UFES, 2020. p. 242

SANTANA, R. O.; DELGADO, R. C.; SCHIAVETTI, A. Modeling susceptibility to forest fires in the Central Corridor of the Atlantic Forest using the frequency ratio method. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113-343, 2021.

SCHUMACHER, M. V.; DICK, G. **Incêndios Florestais**. 3. ed. rev ed. Santa Maria: UFSM, CCR, Departamento de Ciências Florestais, 2018.

SILVA, P. F. *et al.* Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017.

SILVA, J. L. B. *et al.* Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, 2020.

SILVA, J. P. M. **Modelagem de riscos de incêndios florestais e otimização da alocação das estruturas de combate por meio de técnicas de inteligência artificial**. 2023. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2023.

SILVA JUNIOR, J. A.; PACHECO, A. da P. Avaliação de incêndio em ambiente de Caatinga a partir de imagens Landsat-8, índice de vegetação realçado e análise por componentes principais. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 417-439, 2021.

SILVA, P. *et al.* Future projections of fire occurrence in Brazil using EC-Earth Climate Model. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 288-297, 2016.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Incêndios florestais: controle, efeito e uso do fogo**. 2ª edição ed. Curitiba: [s.n.], 2017.

SOUSA, B. R. **Direcionadores dos incêndios florestais no Pantanal: análise temporal e associação com Biomas adjacentes**. 2023. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, 2023.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. Embrapa-CNPAP. Goiânia, 1995.

TEIXEIRA, L. M. N. **Evapotranspiração em vegetação natural do Bioma Caatinga obtida por balanço hídrico no solo e por sensoriamento remoto**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, 2018.

TORRES, F. T. P. *et al.* Mapeamento da suscetibilidade a ocorrência de incêndios em vegetação na área urbana de Ubá - MG. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 811-817, 2014.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da Vegetação Brasileira, Adaptada a um Sistema Universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.

VIEIRA, G. dos S. **Análise espaço-temporal do fogo no Bioma Caatinga**. 2021. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, 2021.

WATANABE, R. A. **Um estudo sobre um método de defuzzificação para eventos fuzzy em sistemas baseados em regras**. 2016. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Estadual de Campinas, 2016.

YANG, X.; JIN, X.; ZHOU, Y. Wildfire risk assessment and zoning by integrating maxent and GIS in Hunan Province, China. **Forests**, v. 12, n. 10, 2021.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. **Information and Control**. v. 8, p. 338-353, 1965.

CAPÍTULO I – INCÊNDIOS FLORESTAIS NA CAATINGA: DINÂMICA DE OCORRÊNCIA E CARACTERÍSTICAS IMPULSIONADORAS

RESUMO

A grande atividade antropogênica, associada aos fatores meteorológicos e demais características ambientais, tornam os ambientes semiáridos entre os mais ameaçados do planeta. No Brasil, o Bioma Caatinga localizado ao nordeste do país, corresponde ao maior núcleo de floresta tropical sazonalmente seca do mundo, compreendendo quase que a totalidade do semiárido brasileiro. Assim, esta pesquisa buscou identificar por meio de ferramentas de geotecnologia quais características ambientais são predominantes nas áreas onde ocorreram incêndios florestais na Caatinga no período de 2011 a 2020; e como essas variáveis se correlacionam para que proporcione um ambiente favorável a ocorrência e propagação do fogo. Dessa maneira, foi possível identificar que em uma escala temporal de 10 anos, que o ano de 2015 foi o que apresentou maiores áreas queimadas, enquanto o estado do Piauí foi espacialmente o de maior vulnerabilidade a ocorrência do fogo. De modo geral, ambientes com altitudes inferiores a 600 m; temperatura do ar superior a 24 °C; índice de precipitação pluviométrica inferior a 900 mm, severidade de seca variando de fraca a extrema, evapotranspiração potencial superior a 1.500 mm, índice de vegetação por diferença normalizada de vigor baixo a moderado, índice de área foliar inferior a 3,5 e de Formação Savânica são as que mais impulsionaram a ocorrência de incêndios na Caatinga. As variáveis declividade e orientação do relevo, isoladamente, não demonstraram características capazes de indicar maior ou menor propensão ao fogo. Por fim, as variáveis climáticas e de vegetação apresentaram correlações significativas entre si, bem como a altitude, obteve correlação significativa com a temperatura do ar. Neste sentido, foi possível obter informações importantes para a compreensão ambiental frente a ocorrência de incêndios florestais em um ambiente com especificidade climática e de vegetação como a Caatinga brasileira.

Palavras-chave: Cicatrizes de fogo; Geoprocessamento; Floresta seca; Proteção florestal.

CHAPTER I – FOREST FIRES IN CAATINGA: OCCURRENCE DYNAMICS AND DRIVING CHARACTERISTICS

ABSTRACT

The significant anthropogenic activity, associated to meteorological factors and other environmental characteristics, makes semi-arid environments some of the most threatened on the planet. In Brazil, the Caatinga biome, located in the northeast of the country, corresponds to the largest nucleus of seasonally dry tropical forest in the world, encompassing almost the entirety of the Brazilian semi-arid region. Thus, this research aimed to use geotechnology tools to determine which environmental characteristics are predominant in regions where forest fires occurred in the Caatinga from 2011 to 2020, and how these variables correlate to create an environment favorable for the occurrence and spread of fire. It was identified that, on a temporal scale, 2015 had the largest burned areas, while the state of Piauí was spatially the most vulnerable to fire occurrence. Generally, environments with altitudes below 600 meters, air temperatures above 24°C, precipitation indices below 900 mm, drought severity ranging from weak to extreme, potential evapotranspiration above 1,500 mm, Normalized Difference Vegetation Index of low to moderate vigor, leaf area index below 3.5, and Savanna Formation were the most influential in the occurrence of fires in the Caatinga. The variables of slope and aspect alone, did not show characteristics with potential of indicating greater or lesser fire propensity. Finally, climatic and vegetation variables presented significant correlations among themselves, as well as altitude, which showed a significant correlation with air temperature. In this context, it was possible to obtain important information for understanding the environmental factors related to the occurrence of forest fires in an environment with specific climatic and vegetation characteristics like the Brazilian Caatinga.

Keywords: Dry forest; Geoprocessing; Forest protection; Fire scars.

1. INTRODUÇÃO

Ambientes secos são ecossistemas vitais que recobrem 47% da superfície terrestre (Koutroulis, 2019). No Brasil, o Bioma Caatinga localiza-se ao nordeste do país e corresponde ao maior núcleo de floresta tropical sazonalmente seca da América do Sul e uma das maiores do mundo (Moro *et al.*, 2016; Sá *et al.*, 2021), compreendendo quase

que a totalidade do semiárido brasileiro. Este Bioma é caracterizado por diversos tipos de formações vegetais, sendo a mais comum dominada por árvores de pequeno porte, caducifólias, frequentemente espinhosas, além de plantas como cactos e eufórbias (Peixoto; Luz; Brito, 2016).

A disponibilidade hídrica é um fator limitante para o Bioma Caatinga (Giulietti *et al.*, 2004). A região é caracterizada por altas temperaturas, elevada evapotranspiração e grande variabilidade na distribuição hídrica, com longos períodos de seca, chuvas esparsas e irregulares tanto no espaço quanto no tempo, geralmente de alta intensidade e curta duração (Silva *et al.*, 2020). Essa irregularidade pluviométrica, associada às características geológicas da região, impossibilitam a manutenção dos rios perenes, resultando em uma predominância de redes de rios temporários, os quais são essenciais para prover água para fauna, flora e população local (Giulietti *et al.*, 2004).

Além do desafio imposto pela seca, a Caatinga tem enfrentado um processo histórico de severa degradação, ocasionado principalmente por ações antrópicas. Exemplos dessas ações incluem a extração ilegal de madeira, a exploração mineral e vegetal, e a alteração do uso do solo para inclusão de atividades agrícolas e pecuária. Essas práticas têm resultado em altos índices de desmatamento e fragmentação da vegetação do Bioma, que atualmente preserva cerca de 50% da cobertura vegetal original (Antongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018; Menezes *et al.*, 2012).

A intensa atividade antropogênica, associada a fatores climáticos, tornam os ambientes semiáridos um dos mais ameaçados do planeta (Moro *et al.*, 2016). Estudos indicam que o aumento da temperatura e a variabilidade no regime das chuvas, ocasionarão impactos diretos na intensidade e frequência dos eventos de incêndios (Aragão *et al.*, 2008; Fonseca *et al.*, 2019; Silva Junior; Pacheco, 2021; Silva *et al.*, 2016; Torres *et al.*, 2016, inclusive em cenários mais otimistas (Miranda; Silva; Juvanol, 2023). No entanto, as causas dos incêndios florestais são extremamente complexas, e as condições antrópicas e climáticas são apenas parte dos componentes que contribuem para o risco de ocorrência e propagação (He *et al.*, 2022).

No mundo, diversas combinações de variáveis ambientais têm sido testadas para a modelagem de risco de incêndios, onde a altitude (Barros-Rosa *et al.*, 2022; Bui *et al.*, 2017), orientação do relevo (Bui *et al.*, 2017), temperatura (Arpaci *et al.*, 2014; Barros-Rosa *et al.*, 2022; Dong *et al.*, 2022; Eugenio *et al.*, 2016; Kayet *et al.*, 2020; Pourtaghi; Pourghasemi; Rossi, 2015), precipitação pluviométrica (Chen *et al.*, 2015; Fernandes, 2019) e vegetação (Duarte, 2022; Kayet *et al.*, 2020; Pourtaghi; Pourghasemi; Rossi,

2015; Santana; Delgado; Schiavetti, 2021) além de variáveis socioeconômicas, como densidade demográfica, proximidade às estradas, comunidades e cidades (Bui *et al.*, 2017; Cruz *et al.*, 2022; Fernandes, 2019; Juvanol, 2017), são consideradas de alta capacidade preditiva para os modelos.

As influências dessas variáveis sobre os componentes do triângulo do fogo, bem como a interação entre elas, causam efeitos diretos ou indiretos sobre a susceptibilidade, ocorrência, propagação, intensidade, frequência e extensão dos incêndios florestais (Hang *et al.*, 2024). Para a Caatinga, devido à especificidade climática e de vegetação, pesquisas que permitam caracterizar a ocorrência dos incêndios de acordo com cada uma das variáveis ambientais que o impulsionam são de extrema importância de modo a garantir que os modelos preditivos sejam eficientes para auxiliar na gestão dos fogos florestais.

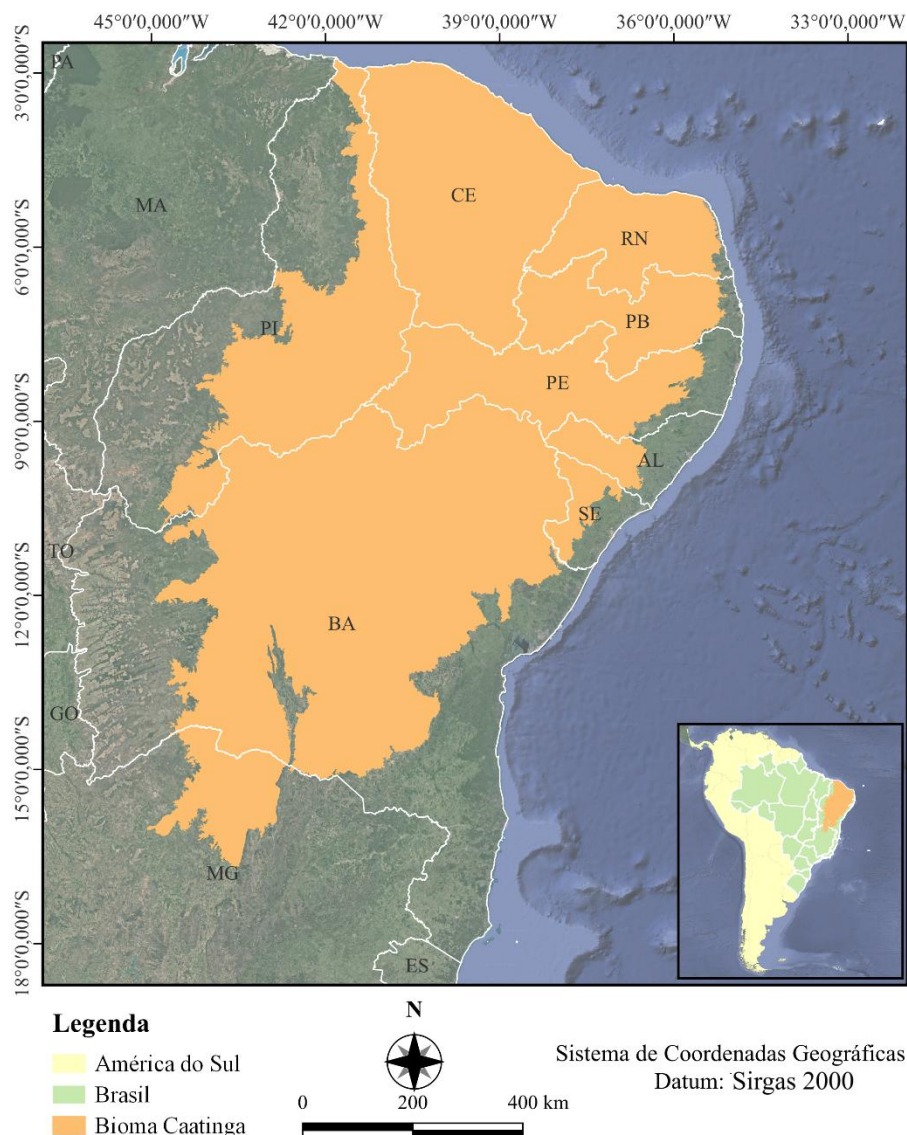
Neste contexto, buscou-se responder por meio desta pesquisa dois questionamentos principais: qual o comportamento dos incêndios florestais na Caatinga no período de 2011 a 2020? e quais características ambientais estão associadas aos eventos de fogo no Bioma? Para tal, utilizou-se ferramentas de geotecnologia para caracterizar a Caatinga e as áreas incendiadas no Bioma entre os anos de 2011 e 2020, de acordo às variáveis ambientais altitude, declividade, orientação do relevo, temperatura do ar, precipitação pluviométrica, evapotranspiração potencial, índice de severidade de seca de Palmer, cobertura do solo, índice de vegetação por diferença normalizada e índice de área foliar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo teve por base todo o território que compreende a Caatinga, Bioma exclusivamente brasileiro, localizado no Nordeste do Brasil, entre as latitudes 2°48'31,320" S e 39°5'20,040" S, e as longitudes 35°10'19,200" W e 44°30'31,680" W. O Bioma ocupa cerca de 862.818 km² (10,1% do território brasileiro), compreendendo o estado do Ceará, a maior parte do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, sudeste do Piauí, oeste de Alagoas e Sergipe, norte e centro da Bahia e uma faixa do norte de Minas Gerais (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização do Bioma Caatinga



Fonte: a autora.

A Caatinga apresenta, predominantemente, o clima BSh (Köppen), semiárido quente, com estação chuvosa curta e irregular e estação seca com altas temperaturas (Alvares *et al.*, 2013). Devido a característica semiárida, a vegetação do Bioma é predominantemente formada por árvores baixas, caducifólias, frequentemente espinhosos, além de plantas como cactos e eufórbias.

2.2 Base de Dados

A altitude, declividade e orientação do relevo foram obtidas por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado na plataforma TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2022). O produto oferecido pelo TOPODATA é

elaborado a partir dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, disponibilizada na plataforma *United States Geological Survey* (USGS).

O conjunto de dados climáticos (temperatura do ar, precipitação pluviométrica, evapotranspiração potencial e Índice de Severidade de Seca de Palmer – PDSI) foram adquiridos por meio da plataforma *TerraClimate* (Abatzoglou *et al.*, 2018) que utiliza por base o conjunto de dados *WorldClim*, combinados a dados de resolução temporal mensal e resolução espacial de aproximadamente quatro quilômetros (1/24 graus). Para este estudo, foi considerado o período entre os anos 2011 e 2020 (10 anos), para representar as séries anuais de cada variável, onde a temperatura, evapotranspiração e PDSI foram representados pela média anual e a precipitação pluviométrica pelo acúmulo de chuva em cada ano.

Os dados de cobertura do solo e cicatrizes de incêndios foram extraídos do *MapBiomas*, disponibilizados na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), com resolução espacial de 30 m e resolução temporal anual. A cobertura do solo foi obtida por meio da Coleção 7.0 (1985-2021) para os anos entre 2011 e 2020, enquanto as cicatrizes são da Coleção 1.0 (1985-2020) para os mesmos anos.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice da Área Foliar (IAF) foram obtidos por meio da plataforma *Google Earth Engine* em linguagem *JavaScript*. Para o cálculo do NDVI, utilizou-se imagens dos satélites Landsat 7 e 8 sob as quais foram aplicadas máscaras para nuvens e sombras. O NDVI foi calculado pela relação entre as bandas do infravermelho próximo (Banda 4 do Landsat 7 e Banda 5 do Landsat 8) e o vermelho (Banda 3 do Landsat 7 e Banda 4 do Landsat 8). Paralelamente, o IAF foi obtido a partir de dados MODIS da coleção MCD15A3H. A média anual do IAF foi calculada e o resultado foi recortado com base na área de interesse. Ambos os índices foram processados anualmente entre 2011 e 2020 e exportados para o Google Drive em uma resolução espacial de 100 metros, proporcionando uma análise detalhada da dinâmica da vegetação na região ao longo do tempo.

Após a aquisição, toda a base de dados foi reprojetada para o Sistema de Projeção Equivalente de Albers, garantindo o uso de coordenadas métricas adequadas à grande extensão da área de estudo. Em seguida, a base foi reamostrada para uma escala de 100 metros. Todas as camadas foram reclassificadas, com os dados quantitativos organizados em intervalos de classes e as variáveis de cobertura do solo classificadas conforme a especificidade de cada uma.

Para a construção dos mapas, todas as camadas foram reprojetadas para Sistema de Coordenada Geográfica, *Datum* WGS 84. O pré-processamento e processamento das variáveis ambientais foram realizadas no *QGIS* versão 3.32.1 Lima, construído a partir de *software* livre.

2.3 Caracterização ambiental e incêndios florestais

Após a reclassificação de todas as camadas foram calculadas as áreas representativas para cada classe das variáveis, de modo a obter a caracterização de todo o território da Caatinga. Em seguida, as camadas de cicatrizes de incêndios anuais foram utilizadas como máscara para sobrepor às variáveis ambientais e extrair as características das áreas onde houve incêndios florestais no período estudado. Para isto utilizou-se a ferramenta “*Interseção*” do *Software QGIS*, que combina as geometrias de duas camadas de entrada e retorna os atributos de ambas as camadas para as partes em que suas geometrias se sobrepõem. Assim, as variáveis que influenciam o risco de incêndios foram associadas às cicatrizes de fogo.

Cabe ressaltar que para as variáveis físicas (que não se alteram no decorrer do tempo), como altitude, declividade e orientação do relevo, foram utilizadas as cicatrizes dos dez anos unidas e eliminadas as sobreposições. Para as demais variáveis, onde houve alteração no decorrer do tempo, considerou-se as cicatrizes de cada ano sobrepostas às características observadas para o ano correspondente, ou seja, cicatriz de 2011 sobreposta a variável observada para o ano de 2011, assim sucessivamente para os dez anos estudados.

2.4 Correlação das variáveis ambientais

Para compreender a interação entre as variáveis ambientais que influenciam a ocorrência dos incêndios florestais, optou-se por utilizar a correlação de Spearman, que assume a não normalidade dos dados. Para tanto, foi criada uma camada vetorial com 2.000 pontos aleatórios distribuídos por toda a extensão do Bioma. A partir desses pontos, foram extraídas informações topográficas, climáticas e de vegetação, levando em consideração os dados climáticos e de vegetação para cada pixel e ano estudado. Essas informações foram obtidas antes da reclassificação realizada para a caracterização ambiental.

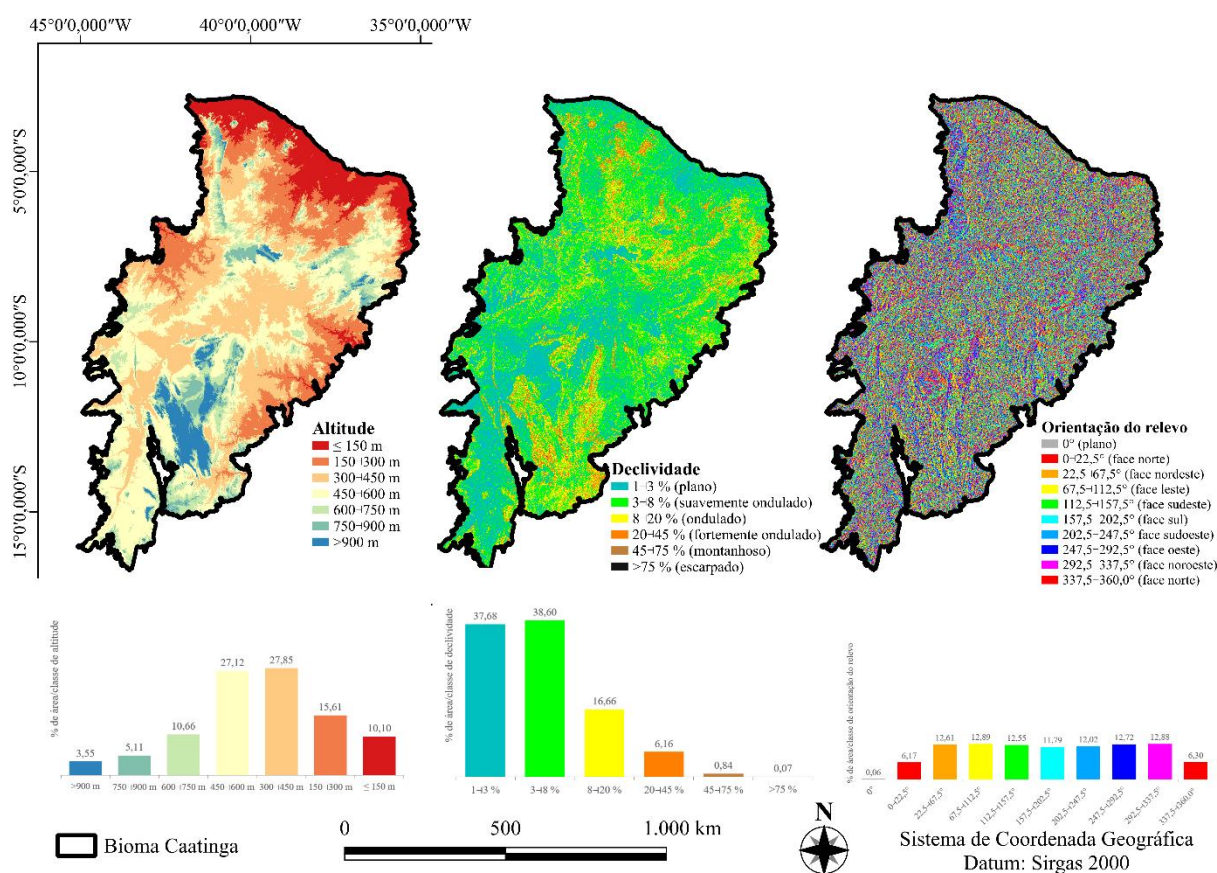
Com a base de dados criada, a análise do coeficiente de correlação de Spearman foi realizada por meio do *software* R (versão 4.4.0), considerando um nível de significância de 5 % ($p_{\text{value}} \leq 0,05$).

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização do Bioma Caatinga quanto as variáveis de risco

As caracterizações do Bioma quanto às variáveis topográficas estão ilustradas na Figura 2. O território da Caatinga possui altitudes que variam de 0 a 2.017 metros, com as menores elevações concentradas na porção norte do Bioma e as maiores altitudes localizadas no Complexo da Chapada Diamantina, no centro sul. Apesar da variação altimétrica, cerca de 70% da extensão do Bioma está compreendida entre 150 e 600 metros de altitude, estando 10,10% abaixo de 150 metros e 19,33% acima de 600 m.

Figura 2 – Caracterização topográfica do território do Bioma Caatinga, Brasil



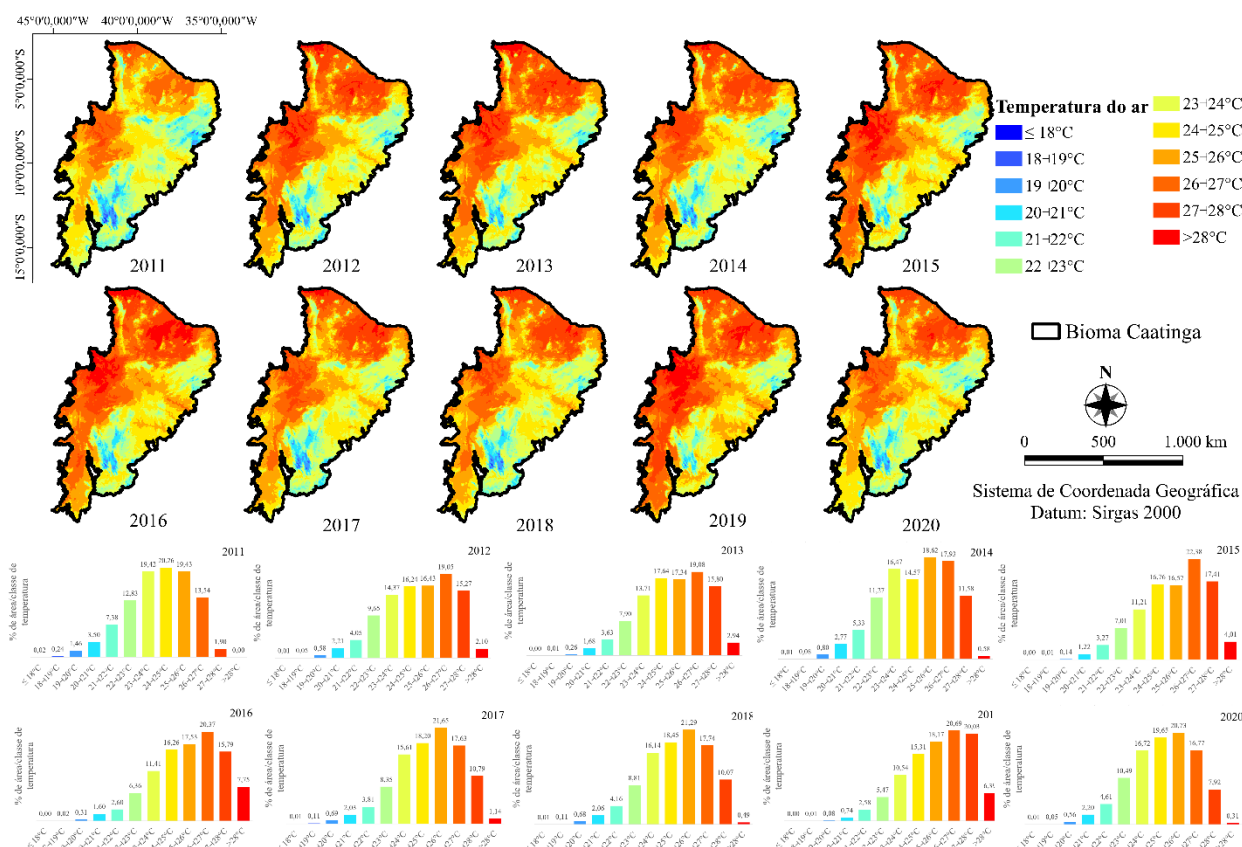
Fonte: a autora.

No que diz respeito à declividade, aproximadamente 93% do Bioma apresenta inclinação inferior a 20%, sendo em sua maior parte caracterizado como terreno plano a

ondulado. Terrenos montanhosos podem ser encontrados nas regiões do Complexo da Chapada Diamantina e em alguns fragmentos nos estados do Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte. Em complemento, a orientação do relevo do Bioma está disposta de maneira bem distribuída entre as diferentes direções, onde aproximadamente 12,5% das áreas estão voltadas para cada uma das faces do terreno: norte ($0-22,5^\circ$ e $337,5-360^\circ$), nordeste ($22,5-67,5^\circ$), leste ($67,5-112,5^\circ$), sudeste ($112,5-157,5^\circ$), sul ($157,5-202,5^\circ$), sudoeste ($202,5-247,5^\circ$), oeste ($247,5-292,5^\circ$) e noroeste ($242,5-337,5^\circ$). Terrenos planos (0°) representam um percentual insignificante dessa distribuição.

As características de temperatura média do ar entre os anos de 2011 e 2020 estão representadas na Figuras 3. Observou-se que o Bioma apresenta temperaturas médias anuais superiores a 24°C na maior parte do território (acima de 55%), em todos os anos analisados, sendo a região central e oeste as mais afetadas.

Figura 3 – Características de temperatura média anual (2011 a 2020) para o Bioma Caatinga



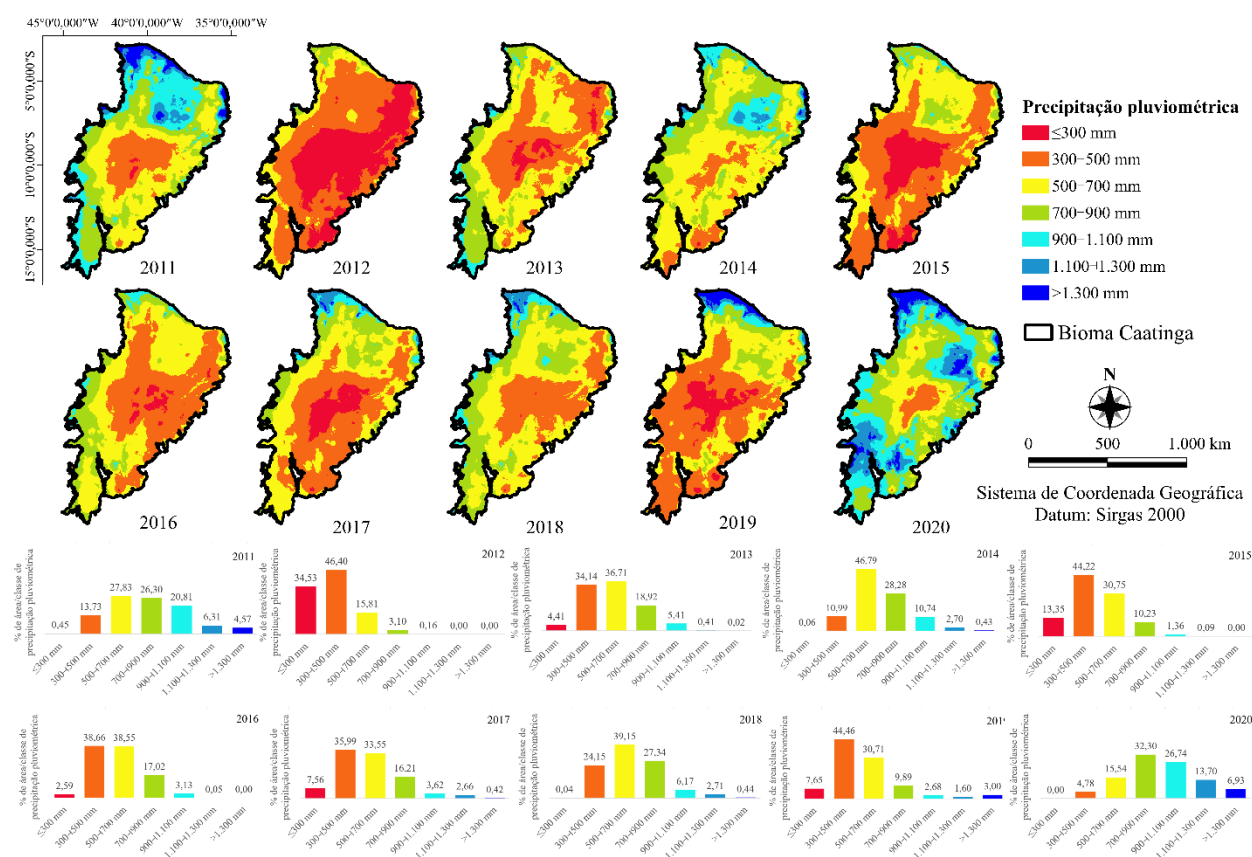
Fonte: a autora.

Os anos de 2015, 2016 e 2019 foram considerados os anos mais quentes da série analisada, com 77,14%, 77,69% e 80,59% da extensão atingidas por temperatura média superior a 24 °C, respectivamente. Em contraste, 2011 foi considerado o ano com as temperaturas mais amenas.

É possível identificar que as regiões da Chapada Diamantina e do Planalto da Borborema (ao leste da Caatinga, entre os estados da Paraíba e Pernambuco) são as que apresentam menores temperaturas quando comparadas às demais, apresentando valores médios anuais inferiores a 20 °C, para todos os anos analisados.

A Figura 4 apresenta o comportamento da variável precipitação pluviométrica no Bioma entre os anos de 2011 e 2020. Nota-se que além de 2011 ter sido o ano com as temperaturas mais amenas, também apresentou a maior precipitação pluviométrica acumulada para o período analisado, assim como o ano de 2020.

Figura 4 – Características de precipitação pluviométrica acumulada (2011 a 2020) para o Bioma Caatinga



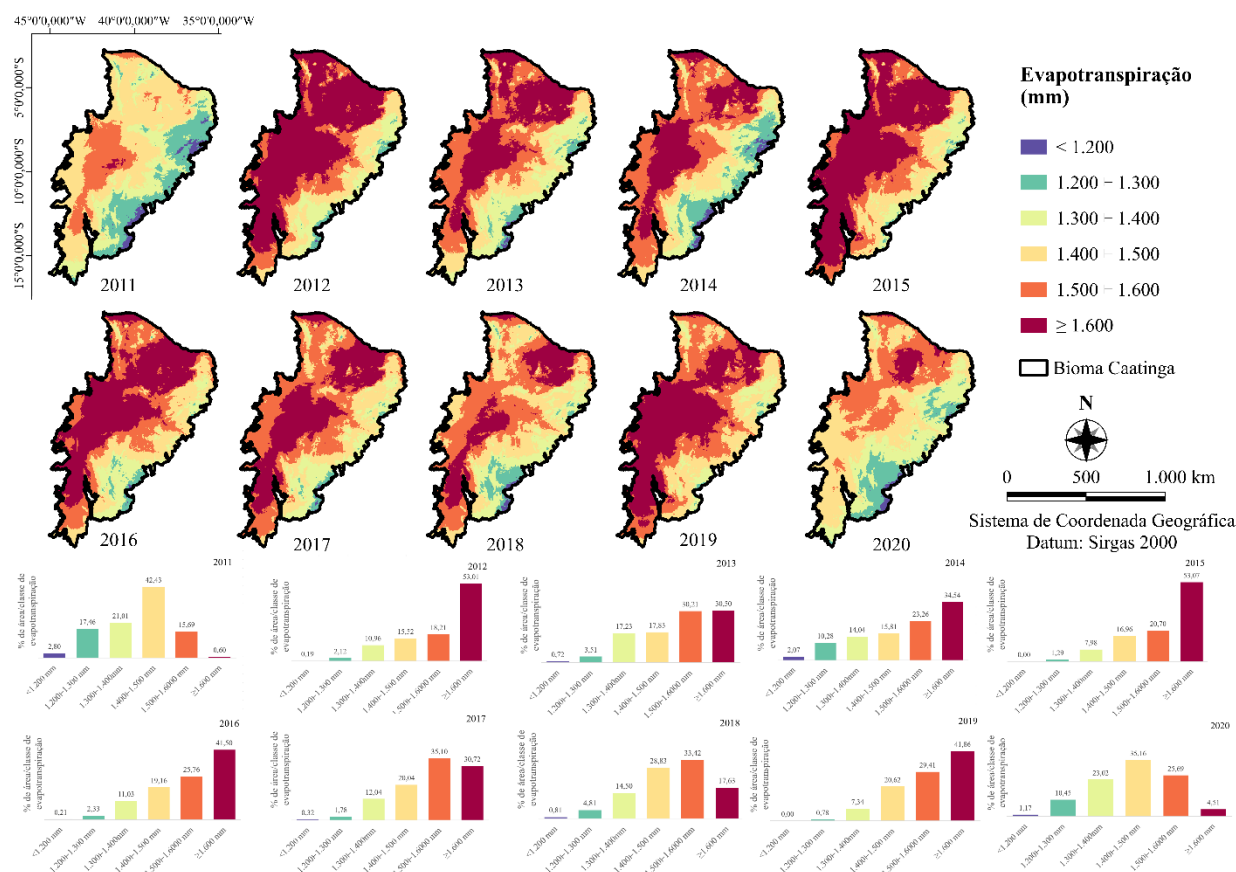
Fonte: a autora.

A análise permitiu observar o comportamento de baixa pluviosidade na Caatinga, onde o ano de 2012 apresentou majoritariamente precipitação pluviométrica acumulada, inferior a 500 mm.

Em todos os anos analisados, inclusive os de maior pluviosidade, observa-se que o Bioma apresentou índices de chuva que não ultrapassaram 1.600 mm, onde foi possível identificar menores acúmulos na porção central do Bioma, e maiores índices nas porções localizadas na região da Caatinga que faz contato com o Oceano Atlântico.

O comportamento das variáveis evapotranspiração potencial e PDSI ao longo dos dez anos observados é apresentado, respectivamente, nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Características de evapotranspiração potencial média (2011 a 2020) para o Bioma Caatinga.

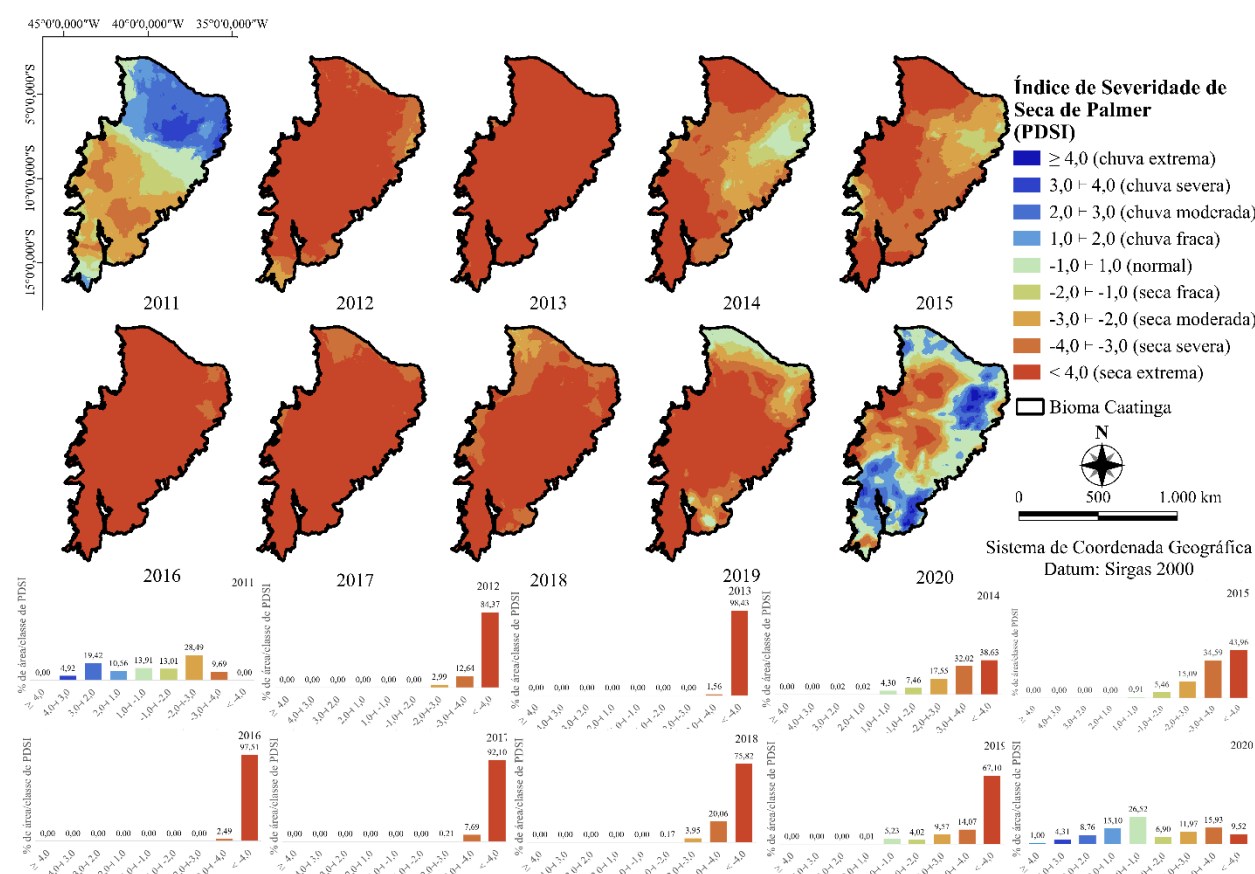


Fonte: a autora

Foi possível identificar que a maior parte da extensão da Caatinga apresenta elevados índices de evapotranspiração potencial e severidade de seca. Para oito dos anos analisados, 2012 a 2019, em mais de 50% do território houve evapotranspiração superior a 1.500 mm, sendo o ano de 2015 o mais crítico, com destaque para as áreas

que englobam os estados do Ceará, Piauí, Maranhão, Minas Gerais, porção dos territórios da Bahia, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. De modo geral, no período estudado, foram observados maiores níveis de evapotranspiração ocorrendo na região central-oeste do Bioma, compreendendo a região denominada de sertão nordestino.

Figura 6 – Características de Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) (2011 a 2020) para o Bioma Caatinga

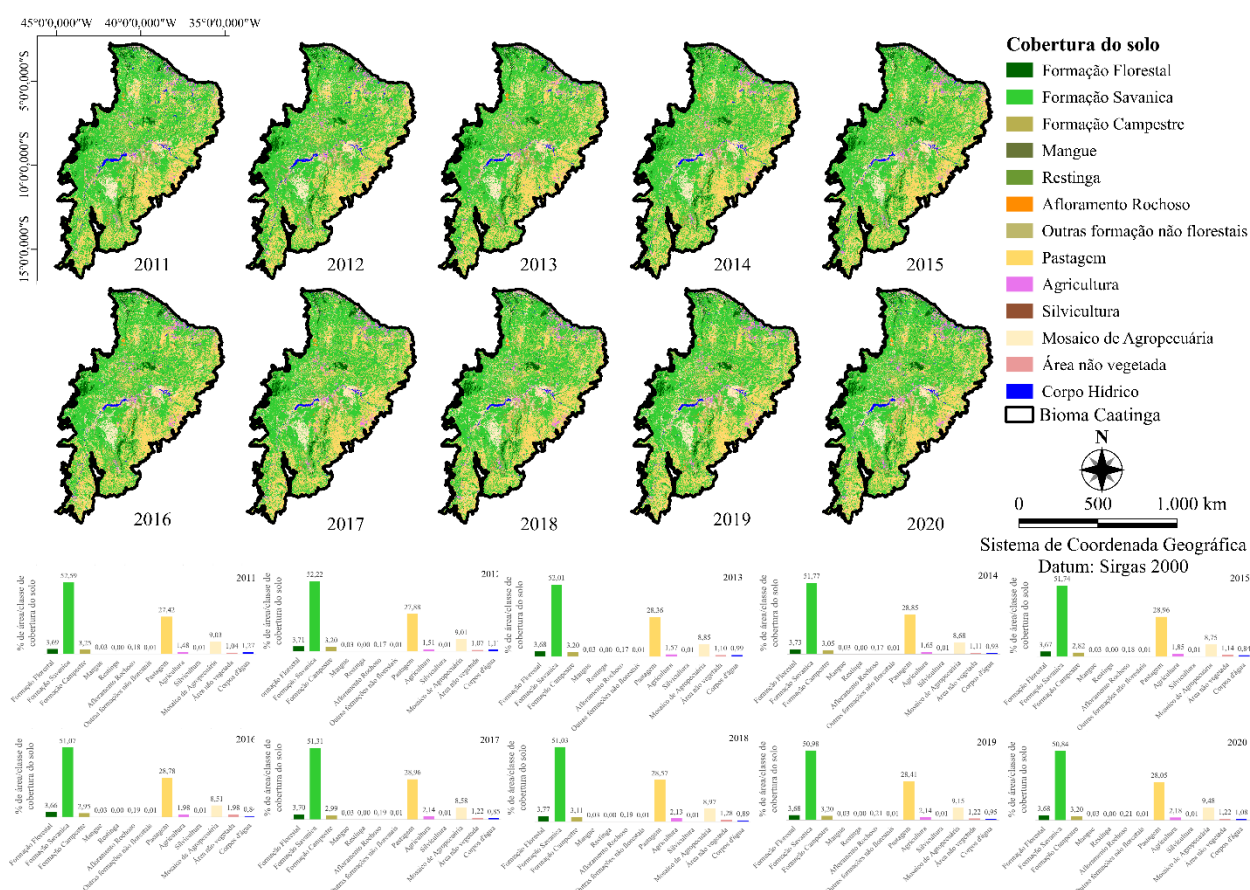


Fonte: a autora.

No que se refere ao PDSI, assim como esperado em um ambiente semiárido, nos anos estudados, mais de 90% do território foi classificado como seco (índice abaixo de -1), exceto 2011 e 2020. Os anos de 2013 e 2016, apresentaram destaque com maiores índices de severidade de seca, apresentando 100% do território do Bioma sob índice de seca severa a extrema. Os anos 2011 e 2020, apresentaram regiões com altos índices de chuva, principalmente nas porções do litoral norte do Bioma, compreendendo os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, e parte da Bahia.

No que diz respeito a variável cobertura florestal, o Bioma é majoritariamente recoberto pela Formação Savânica, com percentual superior a 50%, seguida por pastagens, superior a 27%, em todos os anos estudados. As demais formações representam percentuais inferiores a 10% do território do Bioma. Foi possível observar que dentre os anos estudados há uma leve redução da formação predominante (1,74%), concomitante ao aumento das áreas de pastagem e mosaico de agropecuária (1,78% somados). A formação florestal, localizada principalmente nos limites do Bioma com o Cerrado, não apresentou redução significativa nos dez anos estudados, representando cerca de 3,68% da extensão da Caatinga, enquanto para a formação campestre houve leve oscilação durante este período, variando entre 3,25% (2011) e 2,82% (2015), mas finalizando o estudo retomando a representação de 3,20% (Figura 7).

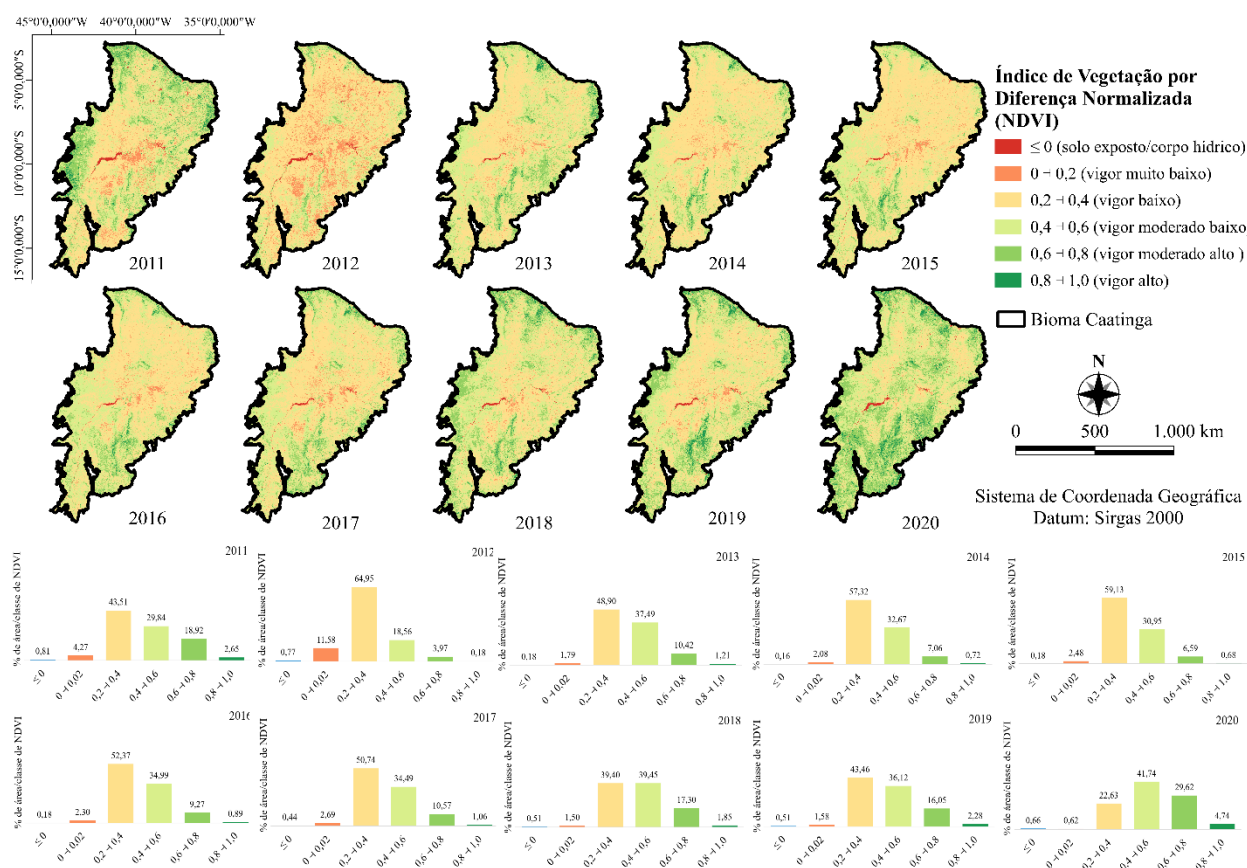
Figura 7 – Características de cobertura do solo entre os anos de 2011 e 2020 para o Bioma Caatinga



Além da tipologia florestal, o vigor dessa vegetação pode ser indicado através do NDVI (Figura 8). De modo geral, a maior percentagem da vegetação da Caatinga se

encontra classificada entre as classes baixa e moderada baixa (acima de 64%). Os anos de 2012, 2014, 2015 e 2016 obtiveram maiores áreas consideradas com vigor vegetativo baixo com 64,95%, 57,32%, 59,13% e 52,37% do território do Bioma, respectivamente. Esta vegetação, localiza-se por toda extensão da Caatinga, mais concentrada na porção central, enquanto o menor percentual de vegetação com alto vigor encontra-se no litoral, nos limites com os Biomas Cerrado e Mata Atlântica. O ano de 2020 foi destaque para o alto vigor vegetativo na Caatinga, classificando o território majoritariamente como moderado (71,35 %).

Figura 8 – Características do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) entre os anos de 2011 e 2020 para o Bioma Caatinga

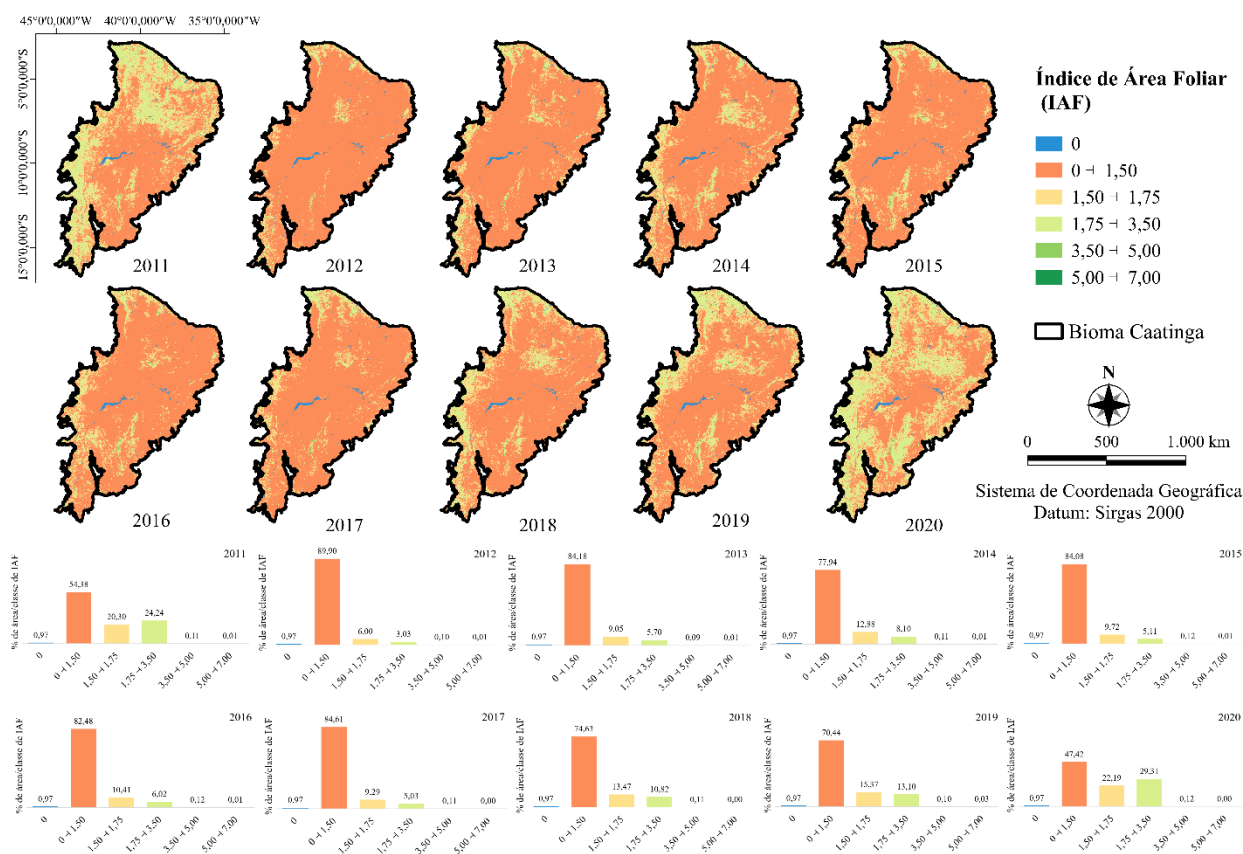


Fonte: a autora.

Por fim, ao que se refere o IAF (Figura 9), a maior parte do território da Caatinga apresenta índice entre 0 e 1,50, indicando vegetação com baixa densidade. Esta classe apresentou variação em área entre os anos estudados, onde os anos de 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017 indicaram maiores extensões do território (acima de 84%) com baixa densidade da vegetação. Os anos de 2011 e 2020 foram os períodos em que a

vegetação do Bioma obteve maiores taxas de IAF. No entanto, em nenhum dos anos houve classificação representativa para alta densidade vegetacional. Ademais, assim como as outras variáveis de vegetação, a maior densidade tem predomínio no limite com o Cerrado.

Figura 9 – Características do Índice de Área Foliar (IAF) entre os anos de 2011 e 2020 para o Bioma Caatinga

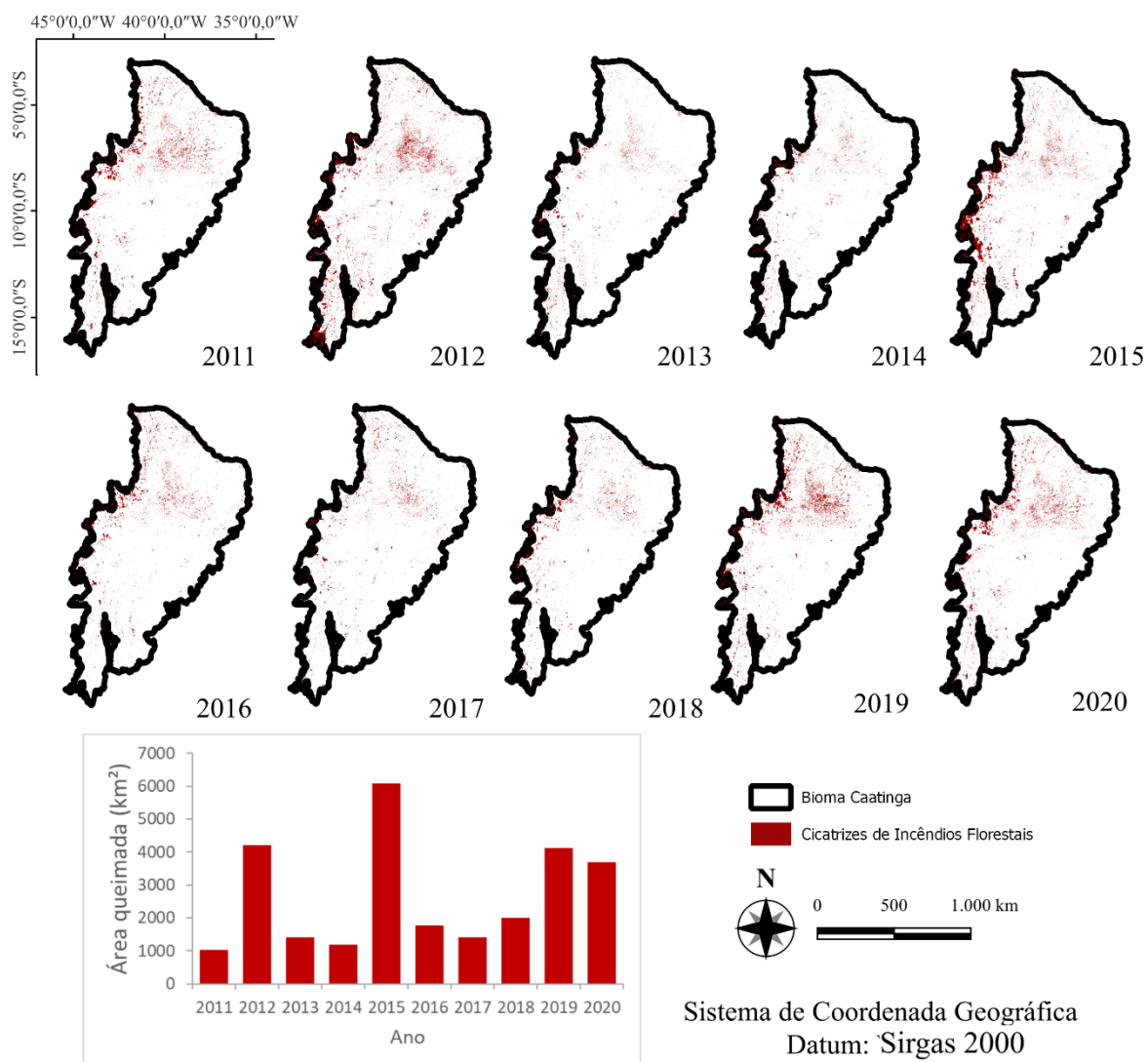


Fonte: a autora.

3.2 Dinâmica da ocorrência de incêndios florestais

Os incêndios que ocorreram no Bioma apresentaram-se de maneira bastante fragmentada, distribuída por todo território, sendo as porções noroeste e sul as mais afetadas. Ao longo dos dez anos avaliados, a Caatinga apresentou 26.936,63 km² de área queimada, correspondendo ao território do estado de Sergipe, aproximadamente. O ano de 2015 foi o mais representativo da série (6.094,04 km²), seguido do ano de 2012 (4.220,82 km²) e 2019 (4.113,48 km²), enquanto os anos de 2011, 2013 e 2017 obtiveram menores valores em área queimada: 1.026,41 km², 1.403,99 km² e 1.416,72 km², respectivamente (Figura 10).

Figura 10 – Série histórica de cicatrizes de incêndios na Caatinga



Fonte: a autora.

O conjunto da série histórica apresenta 114.795 ocorrências de incêndios na Caatinga, onde 97% tiveram extensão de menos de 1 km² de vegetação afetada. No entanto, o ano de 2015, além de conter a maior área total incendiada, apresentou também o maior tamanho de fragmento queimado, com extensão de 533,54 km², ocorrido no estado do Piauí.

As regiões onde houve incêndios durante os anos estudados localizam-se, majoritariamente, no limite oeste do Bioma, onde a Caatinga faz divisa com o Cerrado. No que diz respeito a ocorrência de incêndios por estado, observou-se que o estado do Piauí apresentou a maior quantidade de área queimada (em valores absolutos) durante

todos os anos analisados, alcançando 3.094,63 km² em área queimada no ano de 2015, seguido pela Bahia com 2.647,93 km². Em contrapartida, os estados de Sergipe e Alagoas foram os que apresentaram menores ocorrências de incêndios durante o período observado, com 2,43 km² e 5,66 km² queimados, respectivamente, no ano que mais queimou (Tabela 1).

Tabela 1 – Área queimada em km² por estado da Caatinga entre os anos de 2011 e 2020

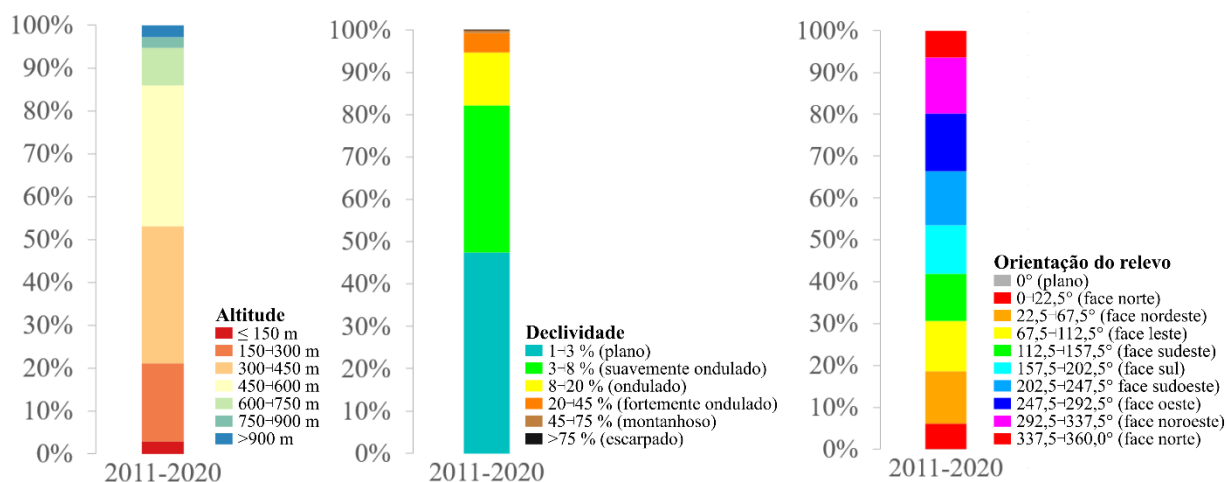
Estado	Área queimada/ano (km ²)									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Piauí	442,07	1.745,29	716,40	684,49	3.094,63	1.109,04	558,93	1.300,98	2.367,88	1.958,10
Bahia	382,98	1.300,15	498,39	322,21	2.647,93	327,22	486,79	361,14	500,98	806,35
Ceará	10,54	485,92	70,27	79,57	163,28	235,83	256,23	166,57	703,83	429,51
Minas Gerais	155,21	441,36	66,94	50,11	89,52	5,11	19,22	50,86	80,53	192,08
Pernambuco	13,99	118,64	31,65	23,36	46,32	44,84	29,58	34,73	83,42	79,63
Paraíba	19,00	92,76	10,04	17,17	29,03	49,83	46,70	71,79	283,93	165,52
Rio Grande do Norte	1,26	37,19	6,02	7,69	14,71	12,02	22,08	25,95	100,70	71,62
Alagoas	2,91	5,94	6,22	3,01	5,66	0,78	2,04	2,50	0,58	1,45
Sergipe	0,53	4,17	2,61	0,35	2,43	0,60	0,69	0,30	0,52	0,08

Fonte: a autora.

3.3 Características ambientais X Incêndios florestais

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para a ocorrência de incêndios de acordo com as variáveis topográficas.

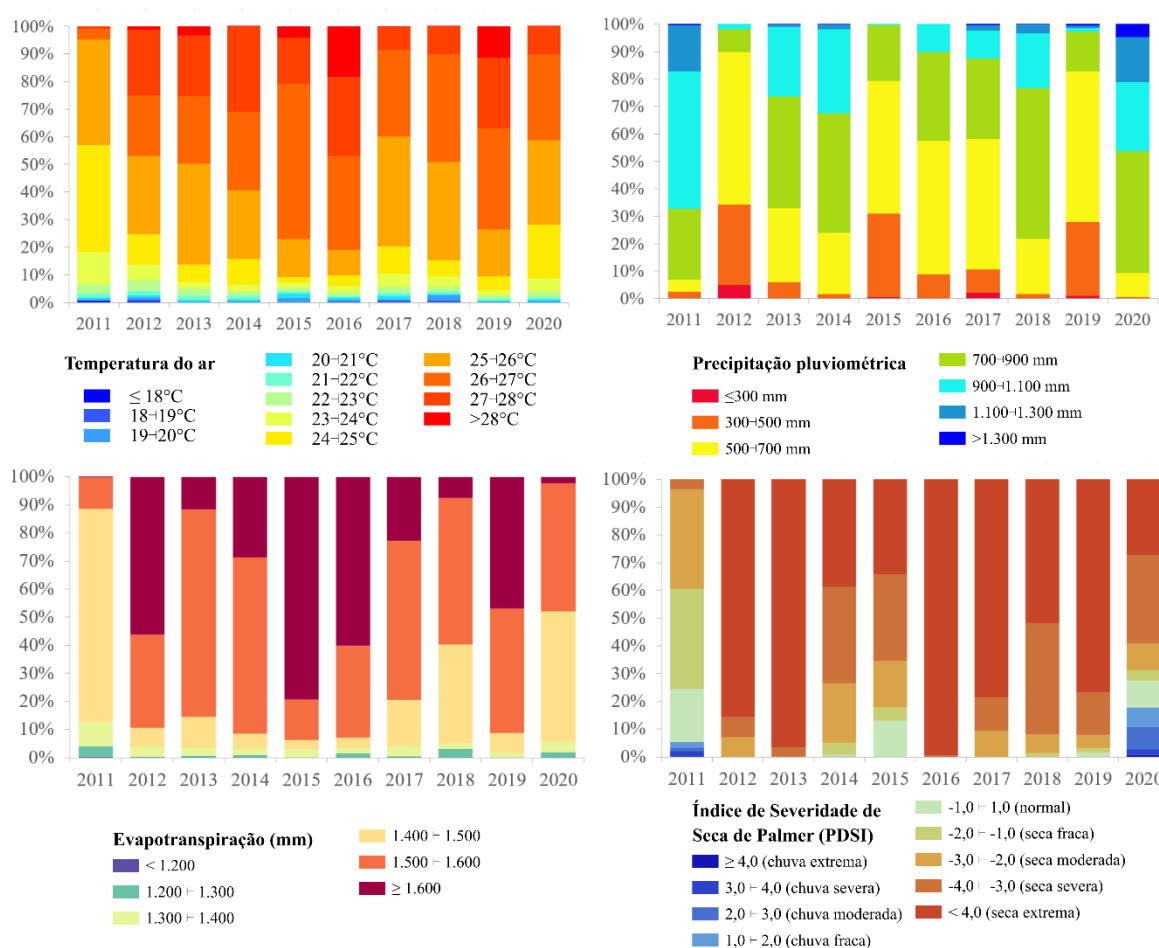
Figura 11 – Área queimada distribuída nas classes das variáveis de altitude, declividade e orientação do relevo na Caatinga



Fonte: a autora.

As informações obtidas para temperatura do ar média, precipitação pluviométrica acumulada, evapotranspiração potencial e PDSI estão apresentadas na Figura 12.

Figura 12 – Área queimada distribuída nas classes das variáveis de temperatura média do ar, precipitação pluviométrica, evapotranspiração potencial e Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) na Caatinga



Fonte: a autora.

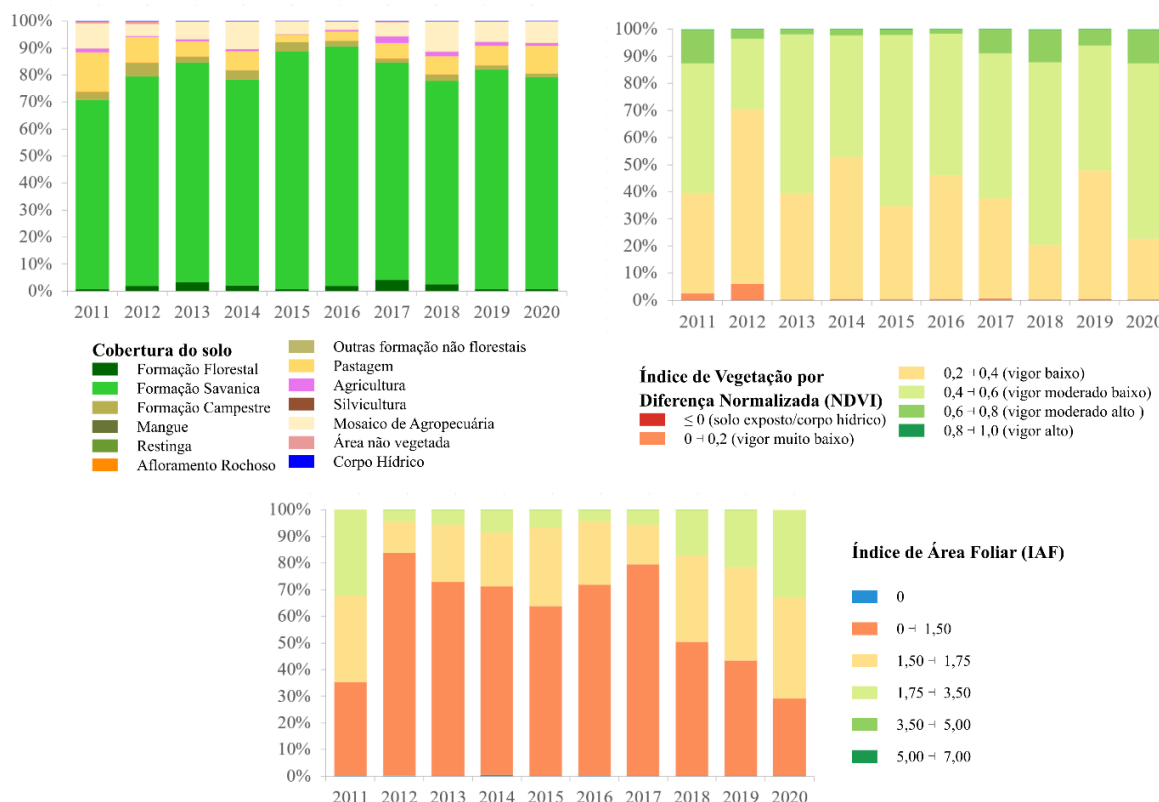
Foi possível identificar o comportamento esperado, em que a temperatura média do ar e a ocorrência de incêndios são diretamente proporcionais em todos os anos analisados, com aproximadamente 80% das áreas de ocorrências de incêndios localizadas em regiões com temperaturas médias superiores a 24 °C, enquanto as regiões com média de temperatura inferior a 22 °C corresponderam a apenas 4%. Já para a precipitação não houve um comportamento padrão. Em geral, os incêndios ocorreram em áreas com precipitação variando entre 300 e 1.100 mm, com variações entre os anos estudados. Entre os anos de 2012 e 2019, mais de 60% das ocorrências

foram em regiões com acúmulo de chuva inferior à 900 mm, com destaque para os anos de 2012, 2015 e 2019. Entretanto, nos anos de 2011 e 2020 as ocorrências se concentraram nas classes, onde ocorreram precipitações superiores a 900 mm.

Quanto à evapotranspiração potencial, os incêndios ocorreram nas regiões onde o índice foi superior a 1.400 mm para todos os anos observados. Entre os anos de 2012 e 2016 e 2019, mais de 85% do território onde ocorreram incêndios na Caatinga apresentou evapotranspiração superior a 1.500 mm, indicando uma relação diretamente proporcional entre a variável e a ocorrência do fogo. Para o PDSI, todos os anos estudados apresentaram cicatrizes de incêndios nas regiões consideradas com índice de seca entre fraca e extrema. No entanto, os anos de 2013, 2016, 2017, 2018 e 2019 compreenderam mais de 90 % da área queimada em classes de seca severa e extrema.

Os dados referentes às cicatrizes e a vegetação, como cobertura do solo, NDVI e índice de área foliar, estão apresentadas na Figura 13.

Figura 13 – Área queimada distribuída nas classes das variáveis cobertura do solo, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de área foliar (IAF) na Caatinga



Fonte: a autora.

A classe de vegetação denominada Formação Savânica ocupa a maior área do Bioma e apresenta a maior incidência de incêndios em todos os anos analisados. Em 2011, mais de 70% das áreas incendiadas pertenciam a essa classe, percentual que aumentou para 88% em 2015, ano em que se registrou o maior número de áreas queimadas no Bioma. Em seguida, as áreas de agropecuária (pastagem, mosaico de agropecuária e agricultura) somam o segundo maior percentual de cicatrizes, alcançando 25,24% para o ano de 2011 e 7,70% para o ano de 2015. Em contrapartida, nas classes de mangue e restinga, não foram observadas cicatrizes de queimadas durante o período estudado. Já nas classes de silvicultura, área não vegetada, corpos d'água e outras formações não florestais, os índices permaneceram abaixo de 1% em todos os anos analisados.

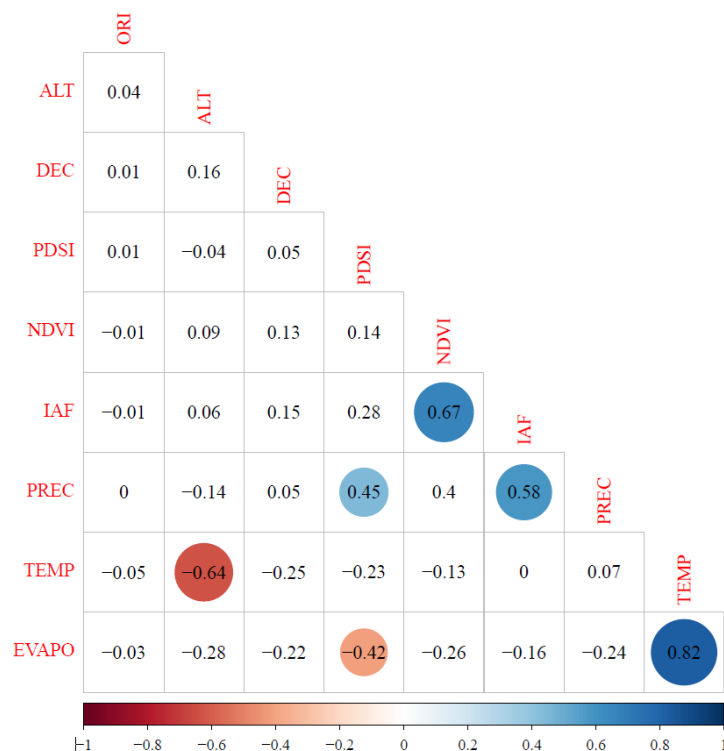
Do mesmo modo, as classes de vigor da vegetação que ocupam as maiores áreas da Caatinga foram as com maior valor de área de cicatriz de incêndio. Mais de 84% das áreas atingidas pelo fogo apresentavam vegetação com vigor baixo ou moderadamente baixo (0,2 – 0,6). O ano de 2012 destaca-se pela ocorrência de aproximadamente 70% das cicatrizes em vegetações de baixo a muito baixo NDVI (0,0 – 0,4), enquanto em 2018 o fogo atingiu 79,17% as classes com NDVI moderado baixo (0,4 – 0,6). Em complemento, as classes extremas de NDVI (0,8 – 1,0) apresentaram valores inferiores a 0,4% em todos os anos analisados.

No que se refere ao IAF, as classes de menor densidade de vegetação foram as mais atingidas pelo fogo, assim como são as de maiores ocorrências no Bioma. De modo geral, no que diz respeito a densidade da vegetação, o comportamento do fogo foi similar para os anos 2012 e 2017, havendo uma grande predominância da classe 0 a 1,50, e para os anos 2011, 2018 a 2020, onde as classes de densidade moderada (1,50 a 3,50) corresponderam a 50% das áreas queimadas.

3.4 Correlação das variáveis ambientais

A Figura 14 apresenta os resultados da correlação de Spearman entre as variáveis ambientais do Bioma Caatinga que impulsionam a ocorrência de incêndios. Foi possível observar que as variáveis topográficas, declividade e orientação do relevo, não apresentaram fortes correlações com as outras variáveis e entre si, inferindo interações não significativas. Já a altitude indicou correlação negativa significativa (-0,64) com a temperatura do ar, não se correlacionando com as demais.

Figura 14 – Coeficiente de correlação de Spearman para as variáveis ambientais topográficas, climáticas e de vegetação do Bioma Caatinga.



Em que: ORI = orientação do relevo; ALT = altitude; DEC = declividade; PDSI = índice de severidade de seca de Palmer; NDVI = índice de vegetação por diferença normalizada; IAF = índice de área foliar; PREC = precipitação pluviométrica; TEMP = temperatura do ar e EVAPO = evapotranspiração potencial.

*Os valores destacados indicam correlação significativa ao nível de 5 % ($p_{\text{value}} \leq 0,05$).

Fonte: a autora

As variáveis climáticas apresentaram correlações significativas entre si, sendo positivas – forte correlação entre temperatura do ar e evapotranspiração (0,82) e média correlação entre precipitação pluviométrica e PDSI (0,45) – e negativas – com média correlação entre PDSI e evapotranspiração (-0,42). Dentre estas, a precipitação pluviométrica também se correlacionou positivamente com o índice de vegetação IAF (0,58). Por fim, as variáveis de vegetação, NDVI e IAF demonstraram forte correlação positiva (0,67).

4. DISCUSSÃO

A transição entre a Caatinga e o Cerrado, localizada nas porções dos estados da Bahia e Piauí, apresentou ambientes mais susceptíveis à ocorrência de incêndios, onde a vegetação tende a ser mais inflamável devido à presença de material fino e tolerante ao fogo, resultado de adaptações morfológicas características do Cerrado (Hoffman et

al., 2012), combinadas com o clima seco e longos períodos sem chuva, típicos da Caatinga. Esses fatores corroboram com o observado durante os anos analisados nesta pesquisa. Silva, Juvanhil e Miranda (2023), ao analisarem um período mais longo (2001-2018), também identificaram maior vulnerabilidade desses estados à passagem do fogo e ressaltam a importância de compreender os padrões de fogo para que medidas possam ser tomadas visando minimizar seus efeitos sobre os ecossistemas.

Ao considerar uma escala temporal de 2011 a 2020, o ano de 2015 se destacou como o que mais ocorreu incêndios e com maior fragmento de área queimada. Neste ano, o Brasil enfrentava período de *El Niño*, que durou entre 2014 e 2016, acompanhado de uma forte seca (Marengo; Cunha; Alves, 2016). Tal período foi marcado por alterações drásticas nos regimes de precipitação pluviométrica, temperatura do ar e umidade relativa, sendo as regiões Norte e Nordeste as mais afetadas. Essas condições favoreceram o aumento nos focos de calor em comparação a períodos anteriores (Diniz *et al.*, 2019) e impulsionou a ocorrência de incêndios florestais.

A análise do comportamento dos incêndios em função das variáveis que oferecem risco ao ambiente estudado permite indicar que a Caatinga apresentou um comportamento semelhante ao descrito na literatura para outras regiões, embora com algumas peculiaridades. Em relação à altitude, que influencia a velocidade do vento, o teor de oxigênio do ar, a temperatura do ambiente e o índice de pluviosidade, os incêndios ocorreram majoritariamente em regiões de elevação inferior a 600 m, corroborando com o descrito por Tagliarini *et al.* (2020), que consideram que, até esse limite, há uma maior secagem do material combustível, proporcionando um maior risco de ignição. Em complemento, há relatos de maiores índices pluviométricos em altitudes superiores, além da correlação negativa entre altitude e temperatura do ar, o que tendem a ocasionar incêndios de menor severidade nestas regiões (Adab; Devi; Karim, 2013; Chuvieco; Congalton, 1989).

Em contrapartida, embora os incêndios se propaguem com maior facilidade em terrenos inclinados, devido a presença de cristas e declives (Kayet *et al.*, 2020) e consequentemente oferecer maior risco para a ocorrência de grandes incêndios florestais (Chuvieco; Congalton, 1989), os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que as áreas queimadas no Bioma ocorreram em sua grande maioria sobre terrenos com declividades abaixo de 8%, considerados como terrenos planos e suavemente ondulados. No entanto, cabe ressaltar que o território da Caatinga apresenta

predominância de terrenos de baixa declividade, fazendo com que esta característica ambiental apresente influência distinta, quando comparada aos outros ambientes.

Para a orientação do relevo, a influência se dá devido a quantidade de calor recebida nas faces do terreno, o que interfere na umidade do solo, na temperatura do ar e na taxa de secagem do material combustível (Adab; Devi; Karim, 2013; Chuvieco; Congalton, 1989; Duarte, 2022). No hemisfério sul, as faces do solo voltadas para o norte recebem maior incidência de radiação solar, seguidas pelas faces oeste e leste, o que faz destas orientações mais quentes e por consequência mais propensas à ocorrência e propagação dos incêndios (Soares; Batista; Tetto, 2017). No entanto, observou-se neste estudo uma distribuição homogênea da ocorrência de incêndios em relação à orientação das vertentes, fator que pode ser explicado devido à localização do Bioma quanto à latitude. Apesar de estar situada ao sul, o Bioma encontra-se próximo à linha do Equador, o que resulta em uma menor influência da orientação do relevo na incidência de raios solares (França *et al.*, 2018; Funari; Tarifa, 2017).

No que diz respeito as variáveis climáticas, a disponibilidade hídrica e as altas temperaturas são fatores limitantes para o Bioma Caatinga (Giulietti *et al.*, 2004) e estas variáveis são reconhecidas como as mais influentes para os incêndios florestais (Arpaci *et al.*, 2014; Prudente; Rosa, 2010; Qiu *et al.*, 2022), interferindo diretamente desde a prevenção até o combate ao fogo (Schumacher; Dick, 2018). Durante os anos estudados, a Caatinga apresentou predominância de ocorrência de incêndios em regiões com temperaturas do ar ligeiramente superiores às descritas na literatura (22° C) para áreas de risco de incêndio alto e muito alto (Barros-Rosa *et al.*, 2022; Sant'Anna *et al.*, 2020). Isso pode ser atribuído às temperaturas médias da região, que naturalmente são superiores às outras regiões do Brasil.

A alta correlação positiva entre temperatura do ar e evapotranspiração potencial, indica que o material combustível acumulado no piso florestal da Caatinga, após período de caducifolia, fique seco rapidamente e consequentemente, mais suscetível à queima. Esses fatores mostraram-se diretamente correlacionados à expansão das áreas queimadas, com uma relação proporcional entre a severidade dessas variáveis e a extensão dos incêndios observados. A singularidade ecológica do Bioma Caatinga contribui para que essas variáveis tenham um papel determinante na propagação do fogo.

A evapotranspiração, ao aumentar com elevações na temperatura, e o índice de seca, ao se agravar pela diminuição das precipitações, criam condições ambientais que

favorecem a combustão, conferindo ao material vegetal características de combustível seco e altamente inflamável (Sousa, 2023). Estas variáveis, apesar de não serem comuns para predição de incêndios florestais em ambientes úmidos, indicaram ser fundamentais para modelagem em regiões secas, onde o comportamento das demais variáveis não elucidaram com precisão onde o fogo acontece com maior frequência.

A precipitação pluviométrica apresentou uma relação inversamente proporcional e significativa com a ocorrência de incêndios, de modo que, à medida que a disponibilidade de chuva aumenta, o risco de ignição e propagação do fogo diminui (He; Shirowzhan; Pettit, 2022). Na área estudada, regiões com maior disponibilidade hídrica proporcionam vegetações mais densas, porém, com maiores teores de umidade, o que reduz a probabilidade de ocorrência de incêndios. Nesse contexto, os resultados encontrados para a Caatinga durante o período estudado são específicos de regiões semiáridas, no entanto assemelham-se ao descrito em literatura para demais regiões do país. Eugenio *et al.* (2016) identificaram que áreas com pluviosidade inferior a 1.000 mm estão sob risco extremo de incêndios, devido à baixa umidade resultante da escassez de chuvas, o que torna o ar e o material combustível mais suscetíveis à ignição.

A cobertura da terra, variável que corresponde ao tipo de vegetação disponível para queima, é considerada como um dos fatores que mais influenciam na ocorrência de incêndios em regiões áridas e semiáridas (Bashari *et al.*, 2016). A classificação do *MapBiomas* considera como Formação Savânica na Caatinga as vegetações com formações de dossel semicontínuo, incluindo formações das fitofisionomias Savana e Savana Estépica (IBGE, 2012), características da região do Cerrado. Desse modo, a grande representatividade das cicatrizes nesta classificação pode ser atribuída ao fato desta formação corresponder a mais de 50% do território da Caatinga, visto que quanto maior a área disponível, maior a propensão de ser acometido pelo fogo.

Devido a característica de formação de dossel semicontínuo, a maior representatividade do IAF na Caatinga é de vegetação de baixa densidade, onde há menor quantidade de área foliar por área de solo ocupada, enquanto as taxas de NDVI encontram-se em maioria nas classes de vigor moderado, o que evidencia a especificidade do Bioma quanto as características da vegetação (árvores de menor porte, caducifólias e com dossel descontínuo) (Giulietti *et al.*, 2004). Em complemento, estas variáveis apresentaram correlação positiva entre si, onde a medida em que se aumenta o IAF, se aumenta o NDVI, além de apresentarem alta influência climática,

contribuindo diretamente na sazonalidade da vegetação (Galvêncio *et al.*, 2020; Nascimento, 2020).

Estas características referentes a IAF e NDVI para o Bioma Caatinga, foram também encontradas quando consideradas as áreas acometidas pelo fogo no período estudado, em que classes de baixo IAF e moderada de NDVI concentraram a ocorrência dos incêndios. Segundo Silva (2022), reduções de NDVI podem indicar aumento na probabilidade de queimadas, visto que ambientes com baixa disponibilidade hídrica favorecem a seca das folhas e contribuem para a caducifolia, que por sua vez disponibilizam material combustível seco e de fácil ignição. Em contrapartida, em ambientes úmidos, o elevado IAF (alta densidade) pode implicar em maior gravidade em caso de ocorrência de incêndios, devido à grande quantidade de materiais combustíveis.

Neste contexto, apesar do efeito individual de cada variável influenciar a ocorrência dos incêndios, a complexidade do fogo requer um conhecimento aprofundado sobre as interações entre estas variáveis. Para um Bioma com característica de semiárido, compreender a especificidade destas relações pode garantir uma estrutura robusta e capaz de representar com maior eficiência os fatores que interferem na ignição e propagação dos incêndios florestais (Torres *et al.*, 2017).

Ademais, a condução de pesquisas voltadas para incêndios florestais na Caatinga, soma-se aos esforços de compreensão global dos efeitos do fogo em ecossistemas de florestas secas (Argibay; Sparacino; Espindola *et al.*, 2020). Os resultados aqui encontrados fornecem informações apropriadas para a análise da dinâmica dos incêndios na Caatinga, subsidiando estudos de zoneamento de risco, gestão do fogo, além de auxiliar na gestão de políticas públicas no combate aos incêndios florestais.

5. CONCLUSÕES

As métricas obtidas para a Caatinga permitiram inferir que durante os dez anos avaliados, o ano de 2015, durante El Nino e seca severa, foi o que apresentou maiores áreas queimadas e o estado do Piauí apresentou maior vulnerabilidade à ocorrência dos incêndios florestais.

Quanto as variáveis ambientais no Bioma, foi possível identificar que de modo geral, ambientes com altitudes inferiores a 600 m; temperatura do ar superior a 24 °C; índice de precipitação pluviométrica anual inferior a 900 mm, severidade de seca variando de fraca a extrema, evapotranspiração potencial superior a 1.500 mm, NDVI de

vigor baixo a moderado, IAF inferior a 3,5 e de Formação Savânica são as que mais impulsionaram a ocorrência de incêndios na Caatinga.

As variáveis declividade e orientação do relevo, isoladamente, não demonstraram características capazes de indicar maior ou menor propensão ao fogo.

Quanto à correlação entre as características ambientais, observou-se que as variáveis climáticas e de vegetação apresentaram correlações significativas entre si, evidenciando a influência do clima sobre o material combustível. Além disso, a altitude também mostrou uma correlação significativa com a temperatura, reforçando o papel desse fator na dinâmica ambiental.

A pesquisa permitiu caracterizar o Bioma de modo a compreender como as variáveis ambientais se comportam e interrelacionam, proporcionando maior ou menor vulnerabilidade à ocorrência do fogo. Neste sentido, as informações geradas podem subsidiar futuros estudos que permitam modelar e gerir de maneira mais consciente os incêndios florestais na Caatinga.

6. REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T. *et al.* TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. **Scientific Data**, v. 5, p. 1–12, 2018.
- ADAB, H.; DEVI, K.; KARIM, K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. **Nat Hazards**, v. 65, p. 1723–1743, 2013.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALENCAR, A. A. C. *et al.* Long-Term Landsat-Based Monthly Burned Area Dataset for the **Brazilian Biomes Using Deep Learning**. *Remote Sensing*, v. 14, p. 2510, 2022.
- ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; FONSECA, C. R. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 8, p. 1353–1367, 2018.
- ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences**, v. 363, p. 1779-1785, 2008.
- ARPACI, A. *et al.* Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. **Applied Geography**, v. 53, p. 258–270, 2014.
- ARGIBAY, D. S.; SPARACINO, J. ESPINDOLA, G. M. A long-term assessment of fire regimes in a Brazilian ecotone between seasonally dry tropical forests and savannah.

Ecological indicators, v. 113, 106151, 2020.

BARROS-ROSA, L. *et al.* Fire probability mapping and prediction from environmental data: What a comprehensive savanna-forest transition can tell us. **Forest Ecology and Management**, v. 520, p. 120354, 2022.

BASHARI, H. *et al.* Risk of fire occurrence in arid and semi-arid ecosystems of Iran: an investigation using Bayesian belief networks. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, p. 1–15, 2016.

BUI, D. T. *et al.* A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 32–44, 2017.

CHEN, F. *et al.* Modeling forest lightning fire occurrence in the Daxinganling Mountains of Northeastern China with MAXENT. **Forests**, v. 6, n. 5, p. 1422–1438, 2015.

CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. **Remote Sens. Environ**, v. 159, n. 29, p. 147–159, 1989.

CRUZ, G. A. *et al.* Modeling the Ignition Risk : Analysis before and after Megafire on Maule Region , Chile. **Applied Sciences**, v. 12, p. 9353, 2022.

DINIZ, F. R. *et al.* **O Impacto do El Niño nos Focos de Incêndio e Desconforto Térmico Humano no Brasil no Período entre o Verão de 2014/2015 e o Outono de 2016.** Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 42, n. 3, p. 192–201, 2019.

DONG, Z. *et al.* Forest Fire Detection of FY-3D Using Genetic Algorithm and Brightness Temperature Change. **Forests**, v. 13, n. 6, 2022.

DUARTE, M. L. **Previsão da suscetibilidade à incêndios e queimadas utilizando um modelo baseado em inteligência artificial e sistema de inferência fuzzy.** 2022. 131 f. Doutorado (Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista, 2022.

EUGENIO, F. C. *et al.* Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 173, p. 65–71, 2016.

FERNANDES, L C. **Modelagem de risco de incêndios florestais utilizando redes neurais artificiais aplicada às regiões metropolitanas.** 2019. 178 f. Dissertação (Análise e Modelagem de Sistemas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

FONSECA, M. G. *et al.* Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2931–2946, 2019.

FRANÇA, M. M. *et al.* Topographic shadow influence on optical image acquired by satellite in the southern hemisphere. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 5, p. 728 – 740, 2018.

FUNARI, F. L.; TARIFA, J. R. Sunshine, global radiation and net radiation in Brazil.

Revista do Instituto Geológico, v. 38, n. 2, p. 49 – 83, 2017.

GALVINCIO, J. D. *et al.* Correlação linear entre a precipitação e o Índice de Área Foliar do Bioma Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.07 p. 3304-3313, 2020.

GIULIETTI, A. M. *et al.* Diagnóstico da Floresta Nativa do Bioma Caatinga. In: SILVA, J. M. C. (Org.). . **Biodiversidade da Caatinga áreas e ações prioritárias para a Conserv.** Recife: Ministerio do Meio Ambiente, 2004. p. 48–90.

HANG, H. T. *et al.* Exploring forest fire susceptibility and management strategies in Western Himalaya: Integrating ensemble machine learning and explainable AI for accurate prediction and comprehensive analysis. **Environmental Technology & Innovation**, v. 35, p. 103655, 2024.

HE, W.; SHIROWZHAN, S.; PETTIT, C. J. GIS and Machine Learning for Analysing Influencing Factors of Bushfires Using 40-Year Spatio-Temporal Bushfire Data. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 11, n. 6, 2022.

HOLFFMAN, W. A. *et al.* Fuels or microclimate? Understanding the drivers of fire feedbacks at savanna–forest boundaries. **Austral Ecology**, v. 37, p. 634-643, 2012.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INPE, 2022. **Banco de dados geomorfológicos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 12 de nov. de 2022.

JESUS, J. B. *et al.* Análise da incidência temporal, espacial e de tendência de fogo nos Biomas e unidades de conservação do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 176–191, 2019.

JUVANHOL, R S. **Aprendizado de máquina na modelagem de incêndios florestais no estado do Espírito Santo**. 2017. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

KAYET, N. *et al.* Comparative analysis of multi-criteria probabilistic FR and AHP models for forest fire risk (FFR) mapping in Melghat Tiger Reserve (MTR) forest. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 2, p. 565–579, 2020.

KOUTROULIS, A. G. Dryland changes under different levels of global warming. **Science of the Total Environment**, v. 655, p. 482–511, 2019.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanálise**, p. 49–54, 2016.

MENEZES, R. S. C. *et al.* Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Catinga Biome. **Brazilian J. Biol**, v. 72, p. 643–653, 2012.

MORO, M. F. *et al.* A phytogeographical metaanalysis of the semiarid caatinga domain in Brazil. **Botanical Review**, v. 82, n. 2, p. 91-148, 2016.

MYERS, R. L. Convivendo com o Fogo - Manutenção dos Ecossistemas & Subsistência

com o Manejo Integrado do Fogo. **The Nature Conservancy**, v. 850, p. 668–0827, 2006.

NASCIMENTO, K. R. P. **Análise da vegetação nativa no núcleo de desertificação Cabrobó: ferramentas para a conservação da Caatinga**. 2020. 148 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

PEIXOTO, A. L.; LUZ, J. R. P.; BRITO, M. A. **Conhecendo a biodiversidade**. Brasília: MCTIC, CNP, 2016.

POURTAGHI, Z. S.; POURGHASEMI, H. R.; ROSSI, M. Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests , Golestan province , Iran. **Environmental Earth Science**, v. 73, p. 1515–1533, 2015.

PRUDENTE, T. D; ROSA, R. Detecção de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e área de entorno. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia, v. 11, n 35, p. 209-221, 2010.

QIU, L. et al. High-resolution mapping of wildfire drivers in California based on machine learning. **Science of the Total Environment**, v. 833, p. 155155, 2022.

SÁ, C. S. B. de *et al.* Salinization causes abrupt reduction in soil nematode abundance in the Caatinga area of the Submedio San Francisco Valley, Brazilian semiarid region. **Pedobiologia**, v. 85-86, p. 2017–2022, 2021.

SANTANA, R. O.; DELGADO, R. C.; SCHIAVETTI, A. Modeling susceptibility to forest fires in the Central Corridor of the Atlantic Forest using the frequency ratio method. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113–343, 2021.

SANT'ANNA, C. M. *et al.* **Origem e utilização do fogo**. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. M.; RAMALHO, A. H. C. (Org.). Incêndios Florestais. Jerônimo Monteiro, ES: UFES, 2020. p. 242.

SILVA, A. C.; JUVANHOL, R. S.; MIRANDA, J. R. Variabilidade espaço-temporal de ocorrência e recorrência de fogo no Bioma Caatinga usando dados do sensor MODIS. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 1-23, 2023.

SILVA, J. L. B. *et al.* Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, 2020.

SILVA JUNIOR, J. A.; PACHECO, A. P. Avaliação de incêndio em ambiente de Caatinga a partir de imagens Landsat-8, índice de vegetação realçado e análise por componentes principais. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 417-439, 2021.

SILVA, J. P. M. Modelagem de riscos de incêndios florestais e otimização da alocação das estruturas de combate por meio de técnicas de inteligência artificial. 2022. 80 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2022.

SILVA, P. *et al.* Future projections of fire occurrence in Brazil using EC-Earth Climate Model. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 288-297, 2016.

SCHUMACHER, M. V.; DICK, G. **Incêndios Florestais**. 3. ed. rev ed. Santa Maria: UFSM, CCR, Departamento de Ciências Florestais, 2018.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Incêndios florestais: controle, efeito e uso do fogo**. 2ª edição ed. Curitiba: [s.n.], 2017.

SOUSA, B. R. **Direcionadores dos incêndios florestais no Pantanal: análise temporal e associação com Biomas adjacentes**. 2023. 69 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, 2023.

TAGLIARINI, F. S. N. *et al.* Zoneamento do risco de incêndios florestais em bacia hidrográfica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 28779–28790, 2020.

TORRES, F. T. P.; ROQUE, M. P. B.; LIMA, S. L. MARTINS, S. V., FARIA, A. L. L. Mapeamento do Risco de Incêndios Florestais Utilizando Técnicas de Geoprocessamento. *Floresta e Ambiente*, v. 24, e00025615, 2017.

VIEIRA, G. S. **Análise espaço-temporal do fogo no Bioma Caatinga**. 2021. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, 2021.

CAPÍTULO II – DELIMITAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA CAATINGA

RESUMO

As ocorrências de incêndios vêm se intensificando nos últimos anos, em todo o mundo. A Caatinga, Bioma exclusivamente brasileiro, apesar de considerada independente do fogo, vem ganhando destaque quanto às ocorrências de incêndios, principalmente devido ao clima seco e atividades antrópicas. Assim, o objetivo desta pesquisa foi propor um zoneamento de risco de incêndios florestais para o Bioma Caatinga, considerando suas características ambientais (topografia, clima e vegetação) e sociais (proximidade de atividades humanas) aplicadas a ferramentas geotecnológicas, bem como definir regiões prioritárias, a partir do risco aos incêndios florestais, histórico de incêndios e tipo de vegetação, onde a prevenção aos incêndios florestais é essencial para a conservação da biodiversidade da Caatinga. O uso da Lógica *Fuzzy* associada a técnica de Processo de Hierarquia Analítica, permitiu uma modelagem de risco precisa para o Bioma estudado, com 96,6 % de assertividade, classificando o Bioma como de alto risco à ocorrência de incêndios florestais. Quanto a localização, foi possível identificar que as porções norte e oeste com destaque para os limites com o Bioma Cerrado, foram as regiões onde o modelo indicou muito alto risco de incêndio. Dessa maneira, a partir desse resultado e considerando o histórico dos incêndios em vegetações nativas da Caatinga, foi possível delimitar as áreas prioritárias para prevenção. De modo geral, as vegetações inseridas em propriedades privadas têm maior necessidade de proteção (92,02 %), devido à fragmentação e proximidade com atividades agrícolas. As Unidades de Conservação e Terras Indígenas englobaram 7,98 % das áreas onde devem ser adotadas medidas de prevenção aos incêndios florestais, com destaque para a categoria de uso sustentável, modalidade Área de Proteção Ambiental. Quanto aos estados do Bioma com maior destaque para medidas de prevenção aos incêndios com ênfase na conservação da biodiversidade local, Piauí, Bahia e Ceará, tiveram maior representatividade quanto as áreas delimitadas. Estes resultados indicam que medidas de fiscalização e capacitação aos produtores rurais devem ser implementadas para evitar que os incêndios florestais ocasionem perdas nos ecossistemas.

Palavras-chave: Risco de incêndio florestal; Uso do fogo; Lógica *Fuzzy*; Fiscalização ambiental.

CHAPTER II – DEFINING PRIORITY AREAS FOR PREVENTING FOREST FIRES IN THE CAATINGA

ABSTRACT

Fire occurrences have been increasing worldwide in recent years. The Caatinga, an exclusively Brazilian biome, although considered independent of fire, has been gaining prominence in terms of fire occurrences, mainly due to the dry climate and human activities. Thus, the objective of this research was to propose a forest fire risk zoning for the Caatinga biome, considering its environmental (topography, climate and vegetation) and social (proximity to human activities) characteristics applied to geotechnological tools, as well as to define priority regions, based on the risk of forest fires, fire history and type of vegetation, where forest fire prevention is essential for the conservation of Caatinga biodiversity. The use of *Fuzzy* Logic associated with the Analytical Hierarchy Process (AHP) technique allowed accurate risk modeling for the studied biome, with 96.6% assertiveness, classifying the biome as high risk for the occurrence of forest fires. Regarding location, it was possible to identify that the northern and western portions, with emphasis on the limits with the Cerrado Biome, were the regions where the model indicated a very high risk of fire. Thus, based on this result and considering the history of fires in native vegetation of the Caatinga, it was possible to delimit the priority areas for prevention. In general, vegetation located on private properties has a greater need for protection (92.02%), due to fragmentation and proximity to agricultural activities. Conservation units and indigenous lands encompassed 7.98% of the areas where forest fire prevention measures should be adopted, with emphasis on the sustainable use category, Environmental Preservation Area (EPA) modality. As for the states of the Biome with the greatest emphasis on fire prevention measures with an emphasis on the conservation of local biodiversity, Piauí, Bahia and Ceará had the greatest representation in terms of the delimited areas. These results indicate that monitoring and training measures for rural producers should be implemented to prevent forest fires from causing losses to ecosystems.

Keywords: Forest fire risk; Use of fire; *Fuzzy* logic; Environmental monitoring

1. INTRODUÇÃO

O Bioma Caatinga corresponde a uma das maiores formações de floresta tropical sazonalmente seca do mundo e à maior da América Latina. Localizado no Nordeste do Brasil, essa região compreende quase que a totalidade do semiárido brasileiro, com o litoral norte banhado pelo Oceano Atlântico e limitado pelos domínios da Mata Atlântica (a leste e sudeste) e do Cerrado (a oeste e sudoeste). Esse Bioma, assim como outras regiões semiáridas do mundo, compartilha algumas características, incluindo altas temperaturas, elevada evapotranspiração e, principalmente, precipitação irregular, com longos e periódicos períodos de seca e chuvas esparsas (Silva *et al.*, 2020).

De um modo geral, as formações tropicais sazonalmente secas possuem solos férteis e abrigam plantas que não apresentam características adaptativas para sobreviver à passagem do fogo (Moro *et al.*, 2016). De acordo com Pivello *et al.* (2021), em condições naturais, os incêndios na Caatinga são considerados raros devido às características da vegetação local (falta de combustível que sustente o fogo) e à baixa incidência de raios (fator de ignição), fazendo com que o Bioma seja ecologicamente classificado como independente da ação do fogo. Entretanto, este cenário natural tem se transformado devido as ações antropogênicas, tornando a Caatinga um sistema sensível ao fogo.

A vegetação da região semiárida apresenta diversos mecanismos de adaptação à escassez hídrica, com fragmentos extremamente diversos e capazes de conservar a biodiversidade local (Antongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018). O Bioma abriga 4.963 espécies da flora brasileira (Brasil, 2020), incluindo um número considerável de espécies endêmicas (Castelletti *et al.*, 2004). No entanto, quando comparada a outros Biomas tropicais, como a Mata Atlântica e o Cerrado, a Caatinga enfrentou anos de preconceito quanto à sua diversidade e riqueza, o que acarretou um lento processo de estudo e compreensão desse ecossistema (Castelletti *et al.*, 2004; Moro *et al.*, 2015), inclusive no que se refere às respostas da vegetação à passagem do fogo e ao risco de incêndios florestais na região.

As ocorrências de incêndios neste Bioma vêm se intensificando nos últimos anos (Jesus *et al.*, 2019; Leite *et al.*, 2017; Vieira, 2021). Ao longo de 38 anos, a Caatinga registrou 110.000 km² de área queimada, o que corresponde a 6% do total nacional de incêndios e 12,7% do território do Bioma (MapBiomas, 2023). Esses valores colocam o Bioma, exclusivamente brasileiro, como o terceiro no ranking dos mais afetados pelo fogo, ficando atrás apenas do Cerrado (885.000 km²), reconhecido por suas formações

ecológicas dependentes e, em algumas circunstâncias, adaptadas aos incêndios florestais; e da Amazônia (826.000 km²), onde a exploração florestal ocasiona muitos eventos de incêndios. Neste contexto, surge um alerta quanto a atenção científica que o semiárido brasileiro requer quanto às ocorrências e danos causados pelo fogo, bem como intensifica a busca por ferramentas capazes de auxiliar na predição do risco e na delimitação de áreas prioritárias para a prevenção de incêndios, garantido a manutenção da conservação da biodiversidade natural da Caatinga (Bhadoria; Pandey; Kundu, 2021).

A delimitação de áreas que apresentam maior propensão à ocorrência do fogo consiste em uma das ferramentas do Manejo Integrado do Fogo (MIF), que considera critérios ecológicos, climáticos e culturais para propor técnicas de prevenção, combate e conservação dos ecossistemas (Schmidt *et al.*, 2016). Desta forma, o Zoneamento de Risco de Incêndios Florestais (ZRIF) configura um método para a predição de incêndios florestais (Eugenio, 2017; Juvanol, 2017; Ramalho *et al.*, 2021; Silva, 2023; Soualah, Bouzekri, Chenchouni, 2024, Torres *et al.*, 2014; Yang; Jin; Zhou, 2021), o qual pode ser construído com base em técnicas de geoprocessamento e/ou Inteligência Artificial (IA) combinando características ambientais e socioeconômicas a fim de gerar mapas indicativos do risco à ocorrência e propagação do fogo.

Para além da determinação de áreas de risco, definir regiões prioritárias para a prevenção de incêndios é fundamental para compor planos de gestão, conservação e proteção da biodiversidade, principalmente devido aos recursos limitados (Garcia *et al.*, 2021) e à vasta extensão territorial dos Biomas. Ou seja, determinar regiões que apresentam maior risco à ocorrência e propagação dos incêndios proporciona uma visão macro sobre a região estudada, no entanto, do ponto de vista da conservação, a determinação de áreas prioritárias possibilita um maior direcionamento para tomadas de decisão e planejamento (Game, Kareiva, Possingham, 2013).

Assim, a escolha da Caatinga para esta pesquisa sustentou-se na necessidade de reduzir a lacuna de conhecimentos frente aos incêndios florestais na região. Embora não seja o Bioma que mais queima no país em área contínua, a Caatinga apresenta um acumulado significativo de áreas incendiadas ao longo dos anos, além de abrigar uma alta biodiversidade em um território exclusivamente brasileiro.

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi propor um zoneamento de risco de incêndios florestais para o Bioma Caatinga, considerando suas características ambientais e sociais aplicadas a ferramentas geotecnológicas, bem como definir regiões prioritárias onde a prevenção aos incêndios florestais é essencial para a conservação da

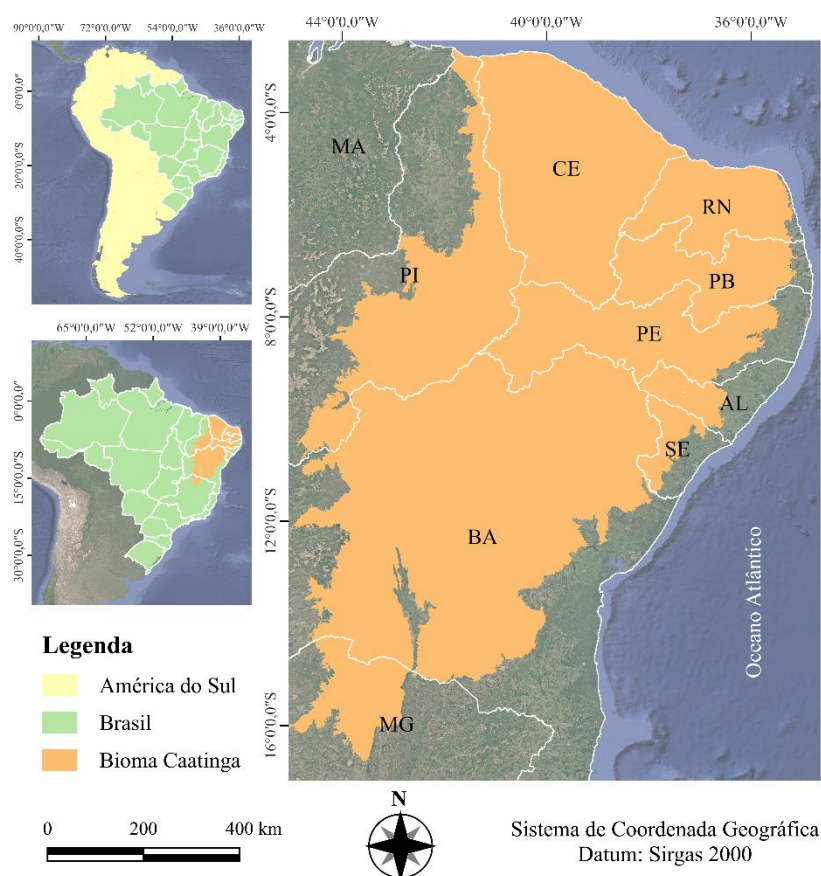
biodiversidade da Caatinga. Para isto, procurou-se responder aos seguintes questionamentos: a) a ferramenta geotecnológica proposta é eficiente na determinação do risco aos incêndios florestais na Caatinga? b) quais as regiões do Bioma onde a prevenção dos incêndios florestais é essencial para a manutenção e conservação da biodiversidade?

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo teve por base todo o território que compreende a Caatinga, Bioma exclusivamente brasileiro, localizado no Nordeste do Brasil, entre as latitudes 2°48'31,320" S e 39°5'20,040" S, e as longitudes 35°10'19,200" W e 44°30'31,680" W. O Bioma ocupa cerca de 862.818 km² (10,1% do território brasileiro), compreendendo o estado do Ceará, a maior parte do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, sudeste do Piauí, oeste de Alagoas e Sergipe, norte e centro da Bahia e uma faixa do norte de Minas Gerais (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização do Bioma Caatinga



Fonte: a autora.

A Caatinga apresenta, predominantemente, o clima BSh (Köppen), semiárido quente, com estação chuvosa curta e irregular e estação seca com altas temperaturas (Alvares *et al.*, 2013). Devido a característica semiárida, a vegetação do Bioma é predominantemente formada por árvores baixas, caducifólias, frequentemente espinhosos, além de plantas como cactos e eufórbias.

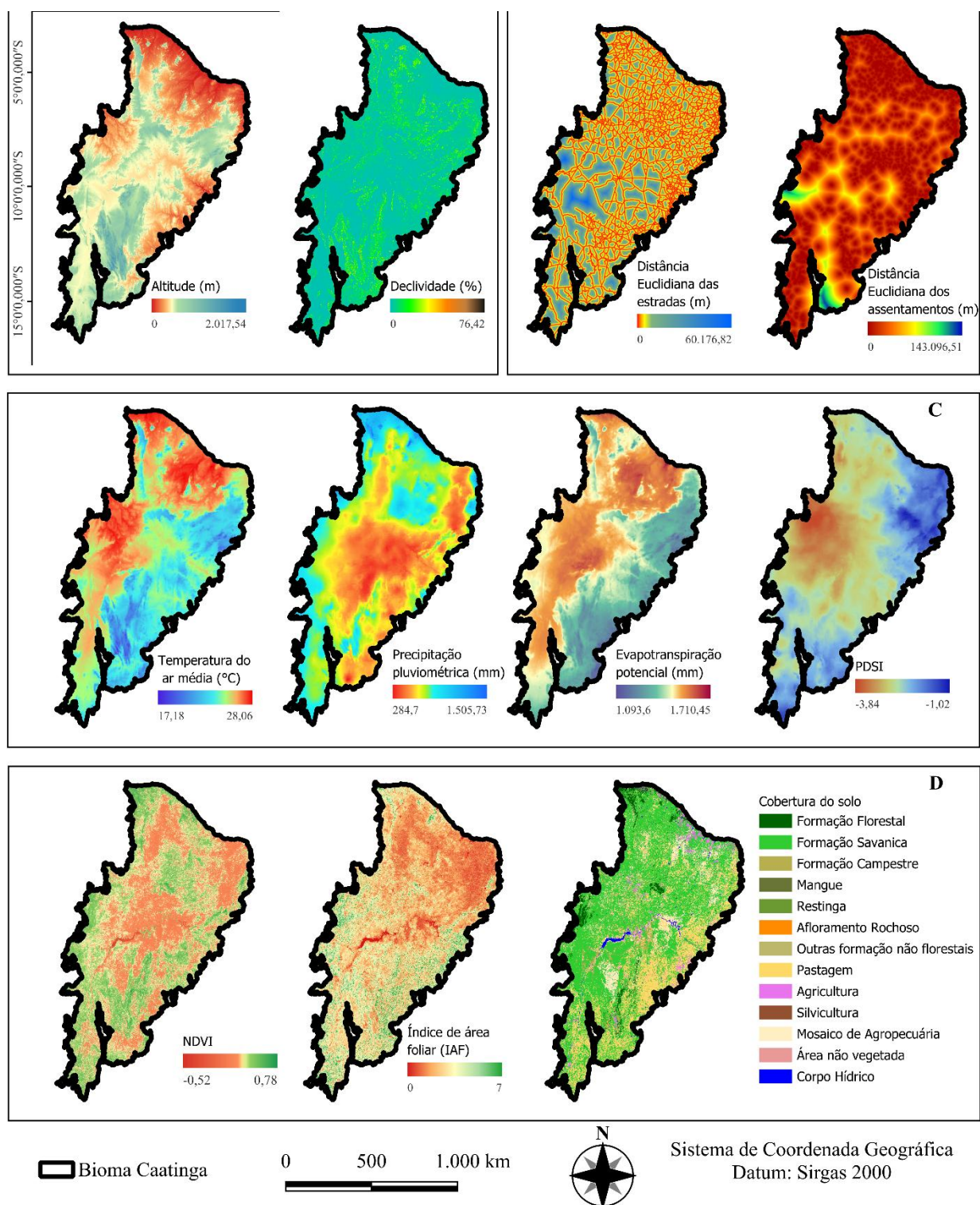
2.2 Base de Dados

As variáveis consideradas para o banco de dados desta pesquisa foram adquiridas de diversas fontes, conforme sessões seguintes, as quais compuseram quatro grupos de variáveis: topográficas, antrópicas, climáticas e vegetacional (Figura 2).

2.2.1 Variáveis topográficas

Os dados topográficos, altitude e declividade, foram obtidos por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE), disponibilizado na plataforma TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2022). O produto oferecido pelo TOPODATA é elaborado a partir dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, disponibilizada na plataforma *United States Geological Survey* (USGS).

Figura 2 – Variáveis que compõem o banco de dados para modelagem de risco de incêndio na Caatinga, agrupados de acordo a natureza: topográfica (A), antrópica (B), climática (C) e vegetacional (D)



Fonte: a autora.

2.2.2 Variáveis antrópicas

As variáveis antrópicas, malha viária e as áreas de terras públicas (assentamentos) do Bioma Caatinga, foram obtidas por meio do catálogo de metadados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2023), em formato vetorial. A malha viária disponibilizada na ANA é proveniente de dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) de 2016 para todo o Brasil, projetados no sistema de coordenadas geográfico, Datum WGS 84, onde são encontradas vias de administração estadual e federal, pavimentadas ou não. Para as terras públicas, a ANA disponibiliza dados provenientes do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) de 2010 para todo o Brasil, projetados no sistema de coordenadas geográficas, Datum Sirgas 2000. Em seguida, foram calculadas as distâncias euclidianas para as duas camadas vetoriais, resultando em camadas matriciais representativas das distâncias para cada variável.

2.2.3 Variáveis climáticas

O conjunto de dados climáticos, temperatura do ar, precipitação pluviométrica, evapotranspiração potencial e índice de vegetação de seca de Palmer (PDSI), foram adquiridos por meio da plataforma *TerraClimate* (Abatzoglou *et al.*, 2018) que utiliza por base o conjunto de dados *WorldClim*. Essa plataforma utiliza como base o conjunto de dados *WorldClim*, combinando informações com resolução temporal mensal e resolução espacial de aproximadamente quatro quilômetros (1/24 graus). Para este estudo, foi considerado o período entre os anos 1992 e 2021 (30 anos), representando uma série histórica significativa para a região, onde a temperatura, evapotranspiração e PDSI foram representados pela média anual e a precipitação pluviométrica foi representada pelo acúmulo anual de chuvas.

2.2.4 Variáveis vegetacionais

Os dados vegetacionais foram obtidos por duas fontes de dados, ambas disponibilizadas por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE). A cobertura do solo foi extraída do Projeto MapBiomas por meio da Coleção 9.0 (1985-2023) para o ano de 2021, com resolução espacial de 30 m e resolução temporal anual, disponibilizada pelo GEE. Enquanto o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice da Área Foliar (IAF) foram obtidos no GEE em linguagem *JavaScript*, para o ano de 2021, em uma resolução espacial de 100 metros.

Para o cálculo do NDVI, utilizou-se imagens dos satélites Landsat 7 e 8 sob as quais foram aplicadas máscaras para nuvens e sombras, e em seguida foi calculado a relação entre as bandas do infravermelho próximo (Banda 4 do Landsat 7 e Banda 5 do Landsat 8) e o vermelho (Banda 3 do Landsat 7 e Banda 4 do Landsat 8). Paralelamente, o IAF foi obtido a partir de dados MODIS da coleção MCD15A3H, e recortado com base na área de interesse. Todas as variáveis de vegetação foram exportadas para o *Google Drive* para posterior modelagem.

Após a aquisição, toda a base de dados foi reprojetada para o Sistema de Projeção Equivalente de Albers, devido a necessidade de trabalhar com coordenada métrica e a grande extensão da área de estudo. Em seguida, a base foi reamostrada para uma escala de 100 metros. Neste sentido, o pré-processamento das variáveis, bem como todo processamento para modelagem do risco e construção dos mapas para demonstração dos resultados, foram realizados no *QGIS* versão 3.32.1 Lima, software livre e de código aberto.

2.2.5 Cicatrizes de incêndios

Para a validação do modelo de risco foram utilizadas as cicatrizes de incêndios ocorridos no ano de 2021 como variável observada. Os dados de cicatrizes de incêndios foram extraídos do MapBiomas, Coleção 3.0 (1985-2023), para o ano de 2021, disponibilizados na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), e exportados para o *Google Drive*, com resolução espacial de 30 m e resolução temporal anual. A escolha de 2021 como ano de estudo deu-se pela representatividade em área queimada ocorrida na Caatinga neste ano (8.991 km²), maior valor da série histórica desde 1985 (MapBiomas, 2023).

Assim como as demais variáveis, a camada cicatrizes foi reprojetada para o Sistema de Projeção Equivalente de Albers e reamostrada para uma escala espacial de 100 metros. Em seguida, criou-se uma camada vetorial representando áreas de fogo (1) e não fogo (0), totalizando 4.936 pontos, onde as áreas de fogo foram extraídas das cicatrizes de incêndios e as áreas de não fogo representaram as classes de solo não propensas aos incêndios florestais (corpos d'água, afloramento rochoso e área não vegetada). Esta camada foi utilizada para avaliar a qualidade e precisão do modelo.

Em complemento, a camada raster das cicatrizes foi transformada em vetor de pontos, onde cada pixel ficou representado por um ponto, o que totalizou 772.319 pontos

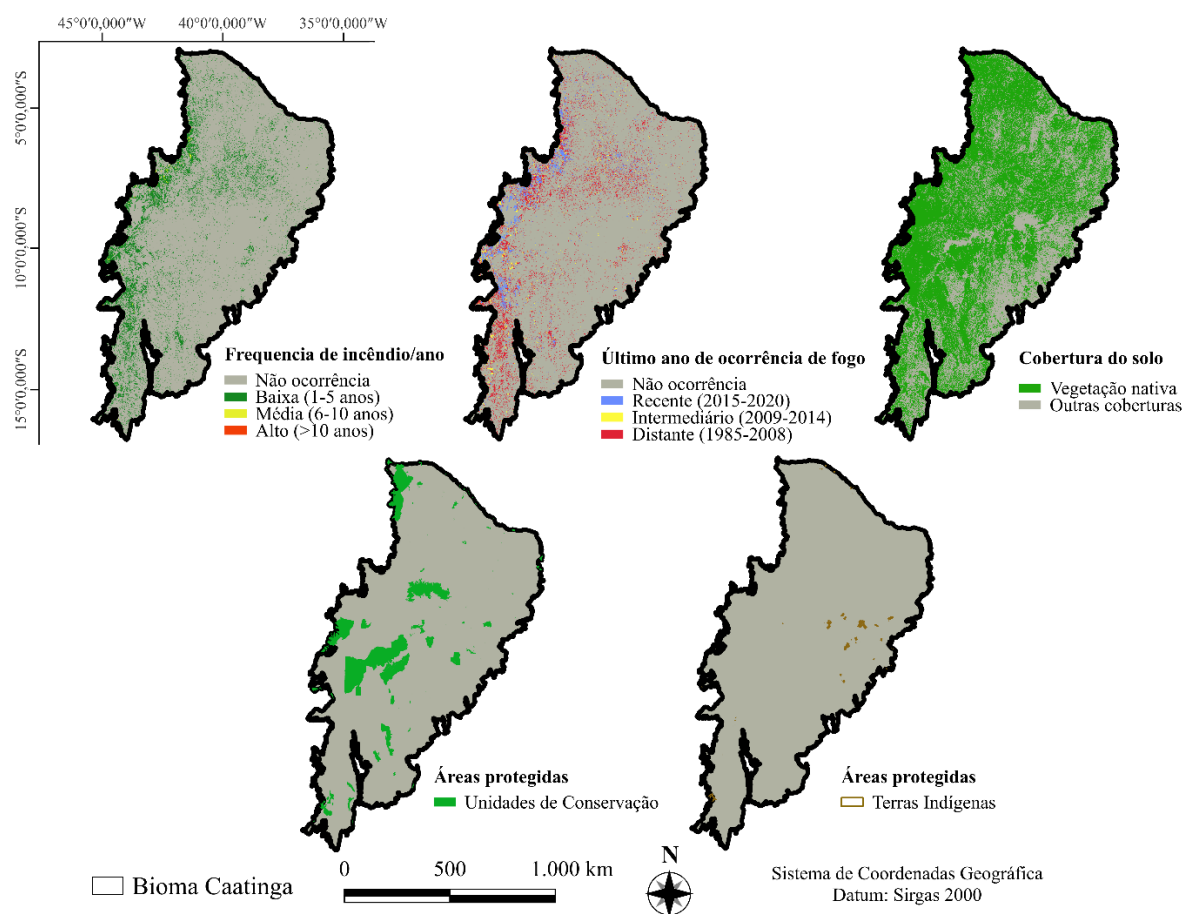
de fogo em todo território da Caatinga no ano de 2021. Esta camada foi utilizada para calcular a densidade de pontos por classe de risco de incêndio ao final da modelagem.

2.2.6 Variáveis para delimitação de áreas prioritárias

Para delimitação das áreas prioritárias foram considerados, além do mapa de risco gerado pela modelagem proposta, a recorrência do fogo no Bioma Caatinga, o tempo desde o último evento de fogo ocorrido e as áreas onde a cobertura do solo dispõe de vegetação nativa. Os dados referentes a recorrência de fogo, tempo desde o último evento de fogo e vegetação nativa foram extraídos do Projeto MapBiomas, da Coleção 3.0 (1985-2023), consideradas as informações de 1985 até 2021, enquanto a vegetação nativa presente no ano de 2021 foi obtida da Coleção 9.0 (1985-2023) (Figura 3).

Por fim, foram utilizadas as camadas de áreas protegidas do Bioma (Unidades de Conservação (UC) e Terras Indígenas (TI)), disponibilizados pelo Instituto Nacional do Semiárido (INSA) (Figura 3).

Figura 3 – Variáveis para delimitação de áreas prioritárias na prevenção dos incêndios florestais na Caatinga



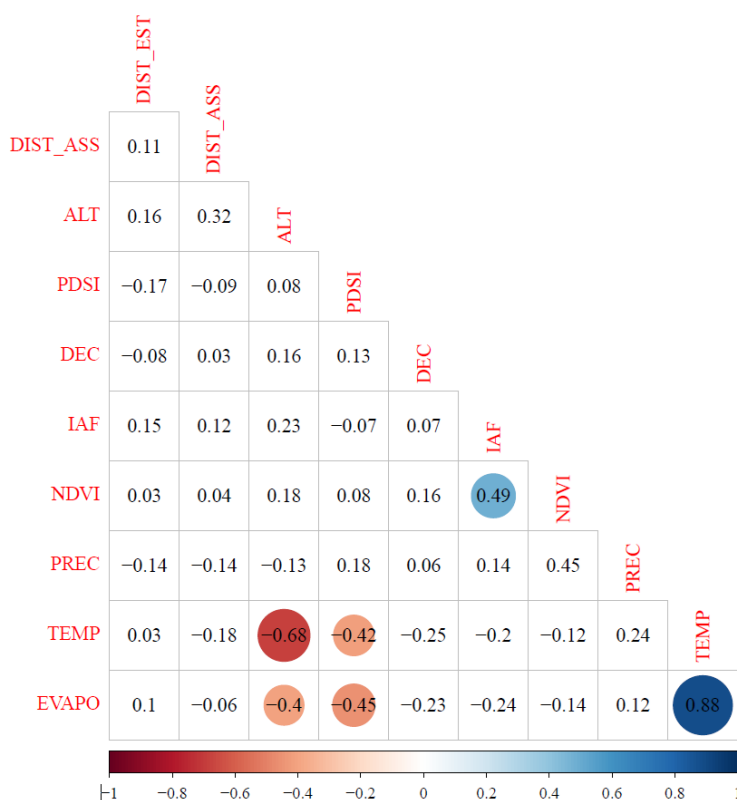
Fonte: a autora.

2.3 Modelagem do risco de incêndios florestais com Lógica Fuzzy

2.3.1 Correlação entre variáveis

De posse dos dados, antes da modelagem do risco de incêndios, foi realizada uma análise de correlação de Spearman no software R (versão 4.4.0) com um nível de significância de 5% ($p_{\text{value}} \leq 0,05$). Essa análise, que assume a não normalidade dos dados, foi aplicada às 11 variáveis quantitativas selecionadas para o estudo: altitude, declividade, distância euclidiana de estradas, distância euclidiana de assentamentos, temperatura do ar, precipitação pluviométrica, evapotranspiração potencial, PDSI, NDVI e IAF (Figura 4). O objetivo foi identificar e eliminar variáveis com alta correlação (valor absoluto maior que 0,7), reduzindo a multicolinearidade e aumentando a confiabilidade do modelo baseado em Lógica Fuzzy (Soualah, Bouzekri, Chenchouni, 2024).

Figura 4 – Coeficiente de correlação de Spearman para as variáveis topográficas, antrópicas, climáticas e de vegetação do Bioma Caatinga



Em que: ALT = altitude; DEC = declividade; TEMP = temperatura do ar; PREC = precipitação pluvial; PDSI = Índice de Severidade de Seca de Palmer; EVAPO = evapotranspiração potencial; NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; IAF = índice de área foliar; DIST_ASS = distância aos assentamentos e DIST_EST = distância às estradas.

**Os valores destacados indicam correlação significativa ao nível de 5 % ($p_{\text{value}} \leq 0,05$).

Fonte: a autora.

Dentre as variáveis correlacionadas, a temperatura do ar e a evapotranspiração potencial apresentaram correlação positiva significativa de 0,88. Assim, considerando a influência da temperatura no cálculo da evapotranspiração potencial e para evitar a multicolinearidade do modelo, optou-se por não incluir a evapotranspiração potencial na modelagem.

2.3.2 Fuzzyficação das variáveis

Em seguida foi delimitada a influência *fuzzy* para cada variável sobre o risco de incêndio florestal. Ou seja, utilizando da metodologia que define a Lógica *Fuzzy* (Zadeh, 1965), onde valores são normalizados de 0 a 1, em que 0 é considerado menos favorável à ocorrência do evento fogo e 1, o mais favorável, foram estabelecidos um conjunto de regras e uma associação *fuzzy* para cada uma das variáveis de entrada, tendo por base funções de pertinência que melhor as descrevam de acordo com a variável resposta (Fernandes, 2019; Ramalho *et al.*, 2021). Assim, para esta pesquisa foram consideradas as funções de associação linear decrescente para a fuzzificação das variáveis altitude, distância euclidiana de estradas, distância euclidiana de assentamentos, precipitação pluviométrica, PDSI, NDVI e IAF; associação linear crescente para *fuzzyficação* das variáveis declividade, temperatura do ar; e função de associação gaussiana para cobertura do solo.

a) Variáveis topográficas

A determinação da função de pertinência linear decrescente para a variável altitude deve-se ao fato de que, quanto menor a altitude da região, maior é o risco de ocorrência de incêndios (conjunto *fuzzy* próximos a 1). Por outro lado, ambientes mais elevados apresentam temperaturas mais baixas e altos índices pluviométricos, tornando-os menos propensos à ocorrência e severidade do fogo (conjunto *fuzzy* próximos a 0) (Adab; Devi; Karim, 2013; Chuvieco; Congalton, 1989; Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020; Soares; Batista; Tetto, 2017). Assim, para a normalização da variável, foi utilizada a função *Raster Fuzzyfy (associação linear)*, na qual à maior altitude (2.017,54 m) foi atribuído o menor valor *fuzzy* (0), e à menor altitude (zero) o maior valor *fuzzy* (1).

Para a declividade, a escolha da função de pertinência linear crescente deve-se ao fato de que aclives acentuados favorecerem à propagação do fogo devido à proximidade das chamas ao material combustível imediatamente à frente, além de renovar o comburente na parte baixa do terreno, mantendo a combustão (Chuvieco;

Congalton, 1989; Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020; Schumacher; Dick, 2018). Ou seja, quanto maior a declividade, maior a probabilidade de propagação dos incêndios florestais. Portanto, para a normalização foi utilizada a função *Raster Fuzzyfy (associação linear)*, atribuindo 0 para o menor valor de declividade (zero) e 1 ao maior valor (67,45°).

b) Variáveis antrópicas

As variáveis antrópicas, distância às estradas e aos assentamentos, apresentam influência inversamente proporcional à ocorrência dos incêndios florestais, ou seja, quanto menor a distância, maior o risco de ocorrência. Dessa forma, para definir a influência das distâncias, utilizou-se a função *Raster Fuzzyfy (associação linear)*, atribuindo o menor valor *fuzzy* (0) aos maiores valores de distância às estradas e aos assentamentos (60.176,82 m e 143.096,51 m, respectivamente) e o maior valor *fuzzy* (1) aos menores valores das distâncias (0 para ambas).

c) Variáveis climáticas

A temperatura do ar exerce uma influência diretamente proporcional a ocorrência dos incêndios florestais, ou seja, quanto mais elevada a temperatura do ar, maior a temperatura do combustível e conseqüentemente, maior o risco de incêndios florestais (Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020). Assim, para a determinação da influência desta variável utilizou-se a função *Raster Fuzzyfy (associação linear)*, em que o menor valor *fuzzy* (0) foi atribuído ao menor valor de temperatura do ar (17,67 °C), e o maior valor *fuzzy* (1) foi atribuído ao maior valor de temperatura do ar (28,06 °C).

Em contrapartida, as variáveis precipitação pluviométrica e PDSI possuem uma relação inversa com a probabilidade de ocorrência de incêndios, visto que quanto menor a precipitação pluviométrica e menor o valor de PDSI, mais seco e mais propenso ao fogo está o ambiente. Neste sentido, utilizou-se a função *Raster Fuzzyfy (associação linear)*, atribuindo o menor valor *fuzzy* (0) aos maiores valores das variáveis precipitação pluviométrica e PDSI (1.489,69 mm e -1,02, respectivamente) e o maior valor *fuzzy* (1) aos menores valores das variáveis (289.20 mm e -3.84, respectivamente).

d) Variáveis vegetacionais

Para a *fuzzy*ificação das variáveis de vegetação, que, apesar de serem quantitativas (NDVI e IAF), possuem valores indicativos de classes, foram consideradas a influência do risco de acordo a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das variáveis de vegetação e influência para a ocorrência dos incêndios florestais na Caatinga

Variável	Classes	Influência no Risco
NDVI	$\leq 0,2$	Muito Baixo
	$0,2 \rightarrow 0,4$	Muito Alto
	$0,4 \rightarrow 0,6$	Alto
	$0,6 \rightarrow 0,8$	Moderado
	$0,8 \rightarrow 1,0$	Baixo
IAF	$0 \rightarrow 1,0$	Muito Baixo
	$1,0 \rightarrow 2,0$	Muito Alto
	$2,0 \rightarrow 3,0$	Alto
	$3,0 \rightarrow 4,0$	Moderado
	$> 4,0$	Baixo
Cobertura do solo	Mangue	Muito baixo
	Área não vegetada	Muito baixo
	Restinga	Baixo
	Agricultura	Moderado
	Formação Campestre	Alta
	Pastagem	Alta
	Formação Savânica*	Muito Alta
	Mosaico de agricultura	Alta
	Formação Florestal	Alta
	Silvicultura	Moderado
	Outras formações florestais	Baixo
	Afloramento rochoso	Muito Baixo
	Corpos d'água	Muito Baixo

Em que: NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e IAF = Índice de Área Foliar.

* Classe de maior risco.

Fonte: a autora

A variável NDVI apresenta comportamento inverso à ocorrência do fogo, ou seja, redução dos índices de NDVI (valores positivos), estão relacionados a maior probabilidade de ocorrência dos incêndios florestais (Costa *et al.*, 2024), sendo o inverso verdadeiro (Silva, 2023). Esse fenômeno está associado à redução dos teores de clorofila e umidade na vegetação, resultando em um material combustível mais seco e, conseqüentemente, mais propenso ao fogo (Ramalho, 2022). Entretanto, é importante

destacar que o NDVI varia de -1 a 1 e, em ambientes semiáridos, valores inferiores a 0,2 correspondem a solo exposto, corpos hídricos e vegetação esparsa (Aquino *et al.*, 2017), indicando uma probabilidade muito baixa de ocorrência de incêndios.

Neste sentido, para a *fuzzy*ificação do NDVI, foi realizada previamente a reclassificação da variável. Em seguida, utilizou-se a função *Raster Fuzzyfy (associação linear)*, considerando os valores inferiores a 0,2 como indicativos de muito baixa probabilidade de ocorrência de incêndio florestais, enquanto valores superiores a esse limite apresentavam uma redução na propensão ao fogo à medida que o índice aumentava.

Do mesmo modo, e considerando a correlação positiva entre NDVI e IAF, para a Caatinga, a variável IAF foi *fuzzy*ificada de acordo a função *Raster Fuzzyfy (associação linear)* decrescente, onde o comportamento da variável é inversamente proporcional a ocorrência dos incêndios florestais, em que quanto menor o índice, maior é a probabilidade de ocorrência dos incêndios florestais (*fuzzy* igual a 1). Este fato está atrelado às características do Bioma, onde a vegetação não apresenta alta densidade, o que contribui para que os incêndios ocorridos na região não tenham altas proporções e gravidade. Ademais, assim como o NDVI, a classe 0 do IAF corresponde a cobertura dos corpos hídricos, sendo este considerado de muito baixa probabilidade de ocorrência na reclassificação.

Por fim, a variável cobertura do solo foi descrita conforme a função *Fuzzyfy Raster (associação gaussiana)*, devido à imprecisão na definição de uma classe em relação à outra. Foram consideradas 13 classes de cobertura do solo presentes no Bioma Caatinga, cuja influência foi determinada com base nas ocorrências de incêndios registradas nos 10 anos anteriores a 2021. Assim, considerando uma distribuição normal em torno de um ponto médio, a classe Formação Savânica foi identificada como a de maior risco, com uma propagação da curva de 0,1

2.3.3 Sobreposição das camadas *Fuzzy* – AHP

Após a *fuzzy*ificação de todas as variáveis que influenciam a ocorrência de incêndios florestais na Caatinga, foi realizada a sobreposição das camadas *fuzzy* utilizando o Processo de Hierarquia Analítica (AHP). Este processo de análise multicritério permite a integração de perspectivas de especialistas, atribuindo pesos aos critérios de acordo com níveis hierárquicos, auxiliando na tomada de decisão (Pragya *et al.*, 2023).

A junção das metodologias Lógica *Fuzzy* e AHP (Buckey, Feuring, Hayashi, 2001) tem sido gradualmente aprimorada para lidar com problemáticas relacionadas à tomada de decisão. Neste sentido, para conduzir as comparações entre as variáveis aqui consideradas, utilizou-se a escala numérica proposta por Saaty 1980 (Pragya *et al.*, 2023) (Tabela 2).

Tabela 2 – Escala *fuzzy* de importância relativa

Scale Saaty	Importância	Escala triangular de números <i>fuzzy</i> (TNF)	Valores inversos	Conversão TNF
1	Igual	(1, 1, 1)	1/1	(1/1, 1/1, 1/1)
2	Intermediário	(1, 2, 3)	1/2	(1/3, 1/2, 1/1)
3	Moderado	(2, 3, 4)	1/3	(1/4, 1/3, 1/2)
4	Intermediário	(3, 4, 5)	1/4	(1/5, 1/4, 1/3)
5	Forte	(4, 5, 6)	1/5	(1/6, 1/5, 1/4)
6	Intermediário	(5, 6, 7)	1/6	(1/7, 1/6, 1/5)
7	Muito forte	(6, 7, 8)	1/7	(1/8, 1/7, 1/6)
8	Intermediário	(7, 8, 9)	1/8	(1/9, 1/8, 1/7)
9	Extremamente forte	(9, 9, 9)	1/9	(1/9, 1/9, 1/9)

Fonte: a autora, adaptado de Pragya *et al.*, 2023.

Esta escala permite inferir o grau de importância que uma variável tem em relação a outra, considerando um resultado específico, ou seja, em cada grupo de variáveis (topográfico, antrópico, climático e vegetacional), foi indicada a importância de uma variável em relação às demais, com base na ocorrência de incêndios florestais. Além disso, também foi considerado o grau de importância de um grupo em relação aos outros, seguindo o mesmo critério. Assim, foram realizadas combinações matemáticas para a geração de mapas de risco de incêndios antrópico, vegetacional, climático e topográfico, e, por fim, o mapa de risco de incêndios integrado para a Caatinga. Para melhor visualização da metodologia, os grupos foram reordenados por escala de importância, com as respectivas escalas representadas nas Tabelas 3 e 4.

A definição dos pesos entre variáveis e grupos foram atribuídos de acordo com os resultados presentes no Capítulo 1, bem como ao conjunto de informações encontradas na literatura referente ao comportamento das variáveis em relação à ocorrência de incêndios florestais.

Tabela 3 – Matriz de comparação pareada entre variáveis que impulsionam a ocorrência de incêndios florestais na Caatinga

Antrópico			Vegetacional			Climático			Topográfico				
DIST_ASS	DIST_EST		CS	NDVI	IAF	TEMP	PDSI	PREC		ALT	DEC		
DIST_ASS	1	2	CS	1	4	2	TEMP	1	4	5	ALT	1	2
DIST_EST		1	NDVI		1	2	PDSI		1	2	DEC		1
			IAF			1	PREC			1			

Em que: TEMP = temperatura do ar; PREC = precipitação pluvial; PDSI = Índice de Severidade de Seca de Palmer; CS = cobertura do solo; NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; IAF = índice de área foliar; ALT = altitude; DEC = declividade; DIST_EST = distância às estradas e DIST_ASS = distância aos assentamentos.

Fonte: a autora.

Tabela 4 – Matriz de comparação pareada entre os grupos impulsionadores à ocorrência de incêndio na Caatinga

	Antrópico	Vegetacional	Climático	Topográfico
Antrópico	1	1	3	5
Vegetacional		1	2	2
Climático			1	4
Topográfico				1

Fonte: a autora.

Para a obtenção dos pesos relativos à cada variável foi realizado o cálculo das matrizes de comparação a partir da definição dos pesos descritos, de acordo com a metodologia descrita por Pragya *et al.* (2023). Desta forma, de posse dos pesos para cada variável e grupo, foi realizada a *defuzzyficação* por meio do operador de soma algébrica, combinadas entre variáveis de um mesmo grupo e entre grupos, respectivamente, de acordo com a Equação 1.

$$RIF = \sum_{i=1}^{10} (w_i \times A_i) \quad \text{Equação 1}$$

Em que: *RIF* é o risco aos incêndios florestais, w_i é o valor do peso da variável i ; e A_i é a função de pertinência do fator i . Os valores do processo *fuzzy* final variam de 0 a 1.

2.3.4 Reclassificação do *Fuzzy* – AHP

O resultado obtido após a sobreposição das camadas apresentou um intervalo de 0 a 1, seguindo a descrição da metodologia da Lógica *Fuzzy*, onde 0 corresponde a menor probabilidade de risco ao fogo e 1 a maior probabilidade de risco. Assim, visando uma maior homogeneidade interna, com agrupamento em classes que apresentem

maior semelhança dentro dos grupos e maior distinção entre eles, foi realizada a reclassificação do produto por meio do método de Quebras Naturais de Jenks. O produto final foi dividido em cinco classes de risco de incêndios florestais: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto, resultando no mapa de risco de incêndios para o Bioma Caatinga.

2.3.5 Validação do modelo de risco

A validação do modelo de risco foi realizada em duas etapas. Inicialmente, por meio do *software* R (versão 4.4.0), considerando o modelo proposto e a camada de pontos de fogo e não fogo, avaliou-se a qualidade e precisão do modelo por meio da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) e AUC (*Area Under the ROC Curve*). A curva ROC é uma ferramenta visual que avalia as taxas de sensibilidade (verdadeiros positivos) (Equação 2) em função da especificidade (falsos positivos) (Equação 3) do modelo, enquanto a AUC indica a área sob a curva ROC.

$$\text{Sensibilidade} = \frac{VP}{VP + FN} \quad \text{Equação 2}$$

$$\text{Especificidade} = \frac{VN}{FP + VN} \quad \text{Equação 3}$$

Em que: *VP* = verdadeiro positivo; *VN* = verdadeiro negativo; *FP* = falso positivo e *FN* = falso negativo

Dessa maneira, considera-se uma AUC-ROC perfeita quando seu valor é igual a 1, enquanto uma AUC-ROC inferior a 0,5 indica um modelo sem capacidade discriminatória (Silva, 2023).

Por fim, por meio da ferramenta "*r.report*" do *QGIS* versão 3.32.1 Lima, foram selecionadas as camadas de pontos representativos das cicatrizes de incêndios e o modelo de risco reclassificado. A partir dessas camadas, foi extraída a seguinte informação: o ponto onde houve incêndio observado no Bioma pertence a qual classe do modelo de risco? A partir dessa informação, analisou-se a densidade de pontos de ocorrência de incêndio em todas as classes de risco propostas pelo modelo.

2.4 Delimitação de áreas prioritárias para prevenção de incêndios

De posse do resultado obtido com a modelagem do risco de incêndios para a Caatinga, descrito no tópico anterior, foram cruzadas informações referentes às áreas

com maior probabilidade de ocorrência de incêndios, de acordo com as características do local, bem como os dados sobre os eventos de fogo ocorridos na região e a tipologia vegetal que necessita de cuidados quanto à ocorrência de incêndios (Martins *et al.*, 2022). Para isso, utilizou-se a ferramenta “*interseção*” do *Software* QGIS para o cruzamento das seguintes informações:

1. Áreas consideradas de riscos alto e muito alto de incêndios florestais, onde há maior probabilidade de ocorrência do fogo;
2. Áreas onde o último incêndio ocorreu a muito tempo (1985-2008), o que resulta em acúmulo de combustível para a queima;
3. Áreas com baixa frequência de incêndios (1-5 anos), onde potencialmente ainda abrigam espécies sensíveis ao fogo, e;
4. Áreas de cobertura vegetal nativa, o que indica preocupação quanto a conservação do Bioma.

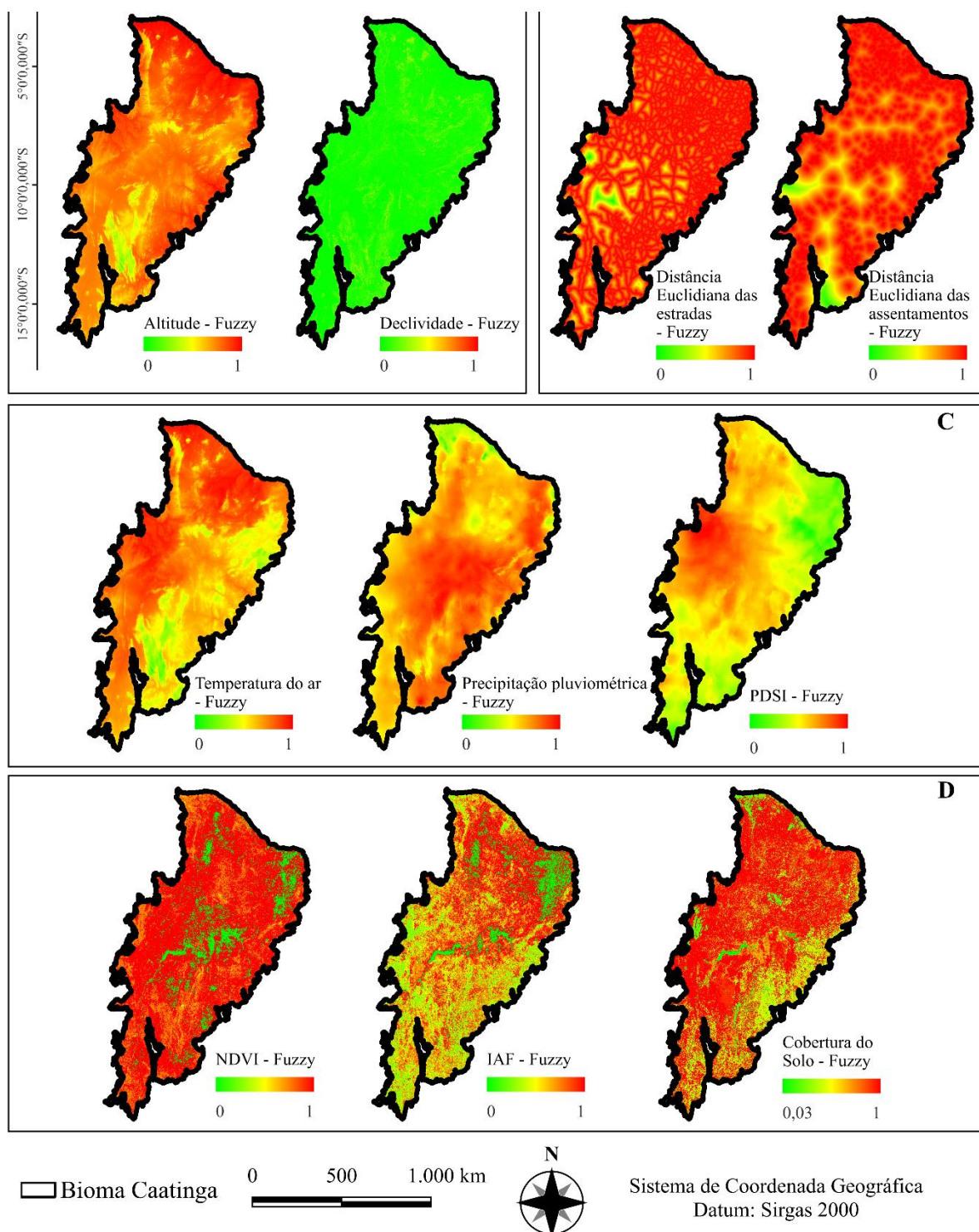
Ou seja, as regiões onde os quatro critérios estabelecidos fossem positivos, são indicados como prioritários para a prevenção dos incêndios florestais e conservação do Bioma Caatinga. Em seguida, considerando o escopo das metodologias empregadas nos planos de prevenção e combate aos incêndios florestais no Brasil (Brasil, 2009), foram também sobrepostas as camadas referentes as áreas protegidas (unidades de conservação e terras indígenas). Assim, foram determinados locais potenciais para implementação e reforço das políticas públicas para a prevenção dos incêndios florestais, com o enfoque na preservação e conservação do Bioma Caatinga.

3. RESULTADOS

3.1 Modelagem do risco de incêndios florestais com Lógica Fuzzy

O mapeamento do risco de incêndios, por meio da modelagem *Fuzzy* – AHP realizado neste estudo, demonstrou-se satisfatório para o Bioma Caatinga. Inicialmente, aplicando as funções de pertinência que melhor descrevem o comportamento das variáveis frente aos incêndios, foi possível visualizar em uma escala espacial as regiões da Caatinga mais suscetíveis à ocorrência do fogo de acordo às características locais (Figura 5).

Figura 5 – Aplicação da Lógica *Fuzzy* sobre as variáveis que influenciam a ocorrência de incêndios na Caatinga, agrupados de acordo a natureza: topográfico (A), antrópico (B), climático (C) e vegetacional (D)



Fonte: a autora.

Os cálculos das matrizes indicadas nas Tabelas 3 e 4 permitiram a obtenção dos pesos necessários para as sobreposições dos fatores associados, os quais estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Pesos das variáveis específicas utilizadas na modelagem de incêndios florestais para o Bioma Caatinga

Grupos	Variáveis	Pesos/variáveis	Pesos/grupos
Antrópico	Distância Euclidiana dos assentamentos	0,64	0,41
	Distância Euclidiana das estradas	0,36	
Vegetacional	Cobertura do Solo	0,57	0,29
	NDVI	0,23	
	IAF	0,20	
Climático	Temperatura	0,68	0,21
	PDSI	0,19	
	Precipitação	0,13	
Topográfico	Altitude	0,64	0,09
	Declividade	0,36	

Em que: NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; IAF = Índice de Área Foliar e PDSI = Índice de Severidade de Seca de Palmer.

Fonte: a autora.

A sobreposição das camadas distâncias euclidianas dos assentamentos e estradas (Equação 4), indica o efeito humano para a ocorrência dos incêndios florestais.

$$RIF_{ANTRÓPICO} = (0,64 \times DIST_{ASS}) + (0,36 \times DIST_{EST}) \quad \text{Equação 4}$$

Em que: $RIF_{ANTRÓPICO}$ é o risco de incêndio florestal com base em variáveis antrópicas; $DIST_{EST}$ = distância às estradas e $DIST_{ASS}$ = distância aos assentamentos.

A sobreposição das camadas cobertura do solo, NDVI e IAF (Equação 5), corresponde ao material combustível presente no solo, disponível para queima.

$$RIF_{VEGETACIONAL} = (0,57 \times CS) + (0,23 \times NDVI) + (0,20 \times IAF) \quad \text{Equação 5}$$

Em que: $RIF_{VEGETACIONAL}$ é o risco de incêndio florestal com base nas variáveis referentes à vegetação; CS = cobertura do solo; $NDVI$ = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; IAF = índice de área foliar.

A sobreposição das camadas temperatura do ar, precipitação pluviométrica e PDSI (Equação 6), indica a influência climatológica para a ocorrência dos incêndios em um Bioma semiárido, onde o clima é fator preponderante na dinâmica do ecossistema.

$$RIF_{CLIMÁTICO} = (0,68 \times TEMP) + (0,19 \times PDSI) + (0,13 \times PREC) \quad \text{Equação 6}$$

Em que: $RIF_{CLIMÁTICO}$ é o risco de incêndio florestal com base nas variáveis climáticas; $TEMP$ = temperatura do ar; $PREC$ = precipitação pluvial; $PDSI$ = Índice de Severidade de Seca de Palmer.

As camadas altitude declividade sobrepostas (Equação 7), indicam a influência topográfica do ambiente à ocorrência e propagação do fogo.

$$RIF_{TOPOGRÁFICO} = (0,64 \times ALT) + (0,36 \times DEC) \quad \text{Equação 7}$$

Em que: $RIF_{TOPOGRÁFICO}$ é o risco de incêndio florestal com base nas variáveis topográficas; ALT = altitude; DEC = declividade.

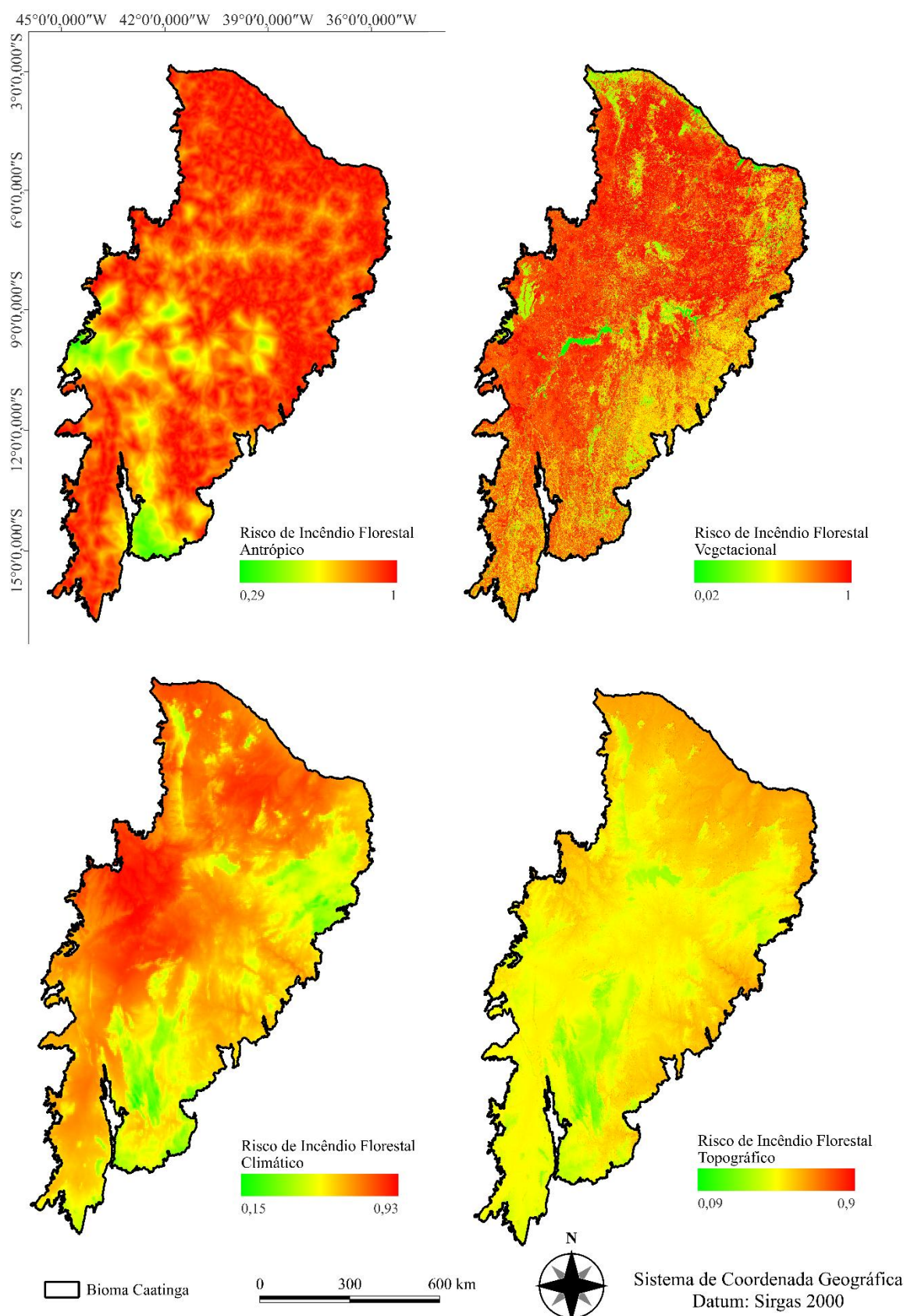
Assim, a aplicação das equações acima permitiu a obtenção do risco de incêndios florestais para a Caatinga de acordo cada um dos grupos de variáveis, onde pode ser visualizado conforme Figura 6.

Em seguida, utilizou-se a Equação 8 para sobrepor os mapas de risco por grupo e sintetizar o mapa de risco de incêndio para o Bioma Catinga. O mapa de risco após a reclassificação de Jenks, pode ser observado na Figura 7.

$$\begin{aligned} RIF_{BIOMA CAATINGA} &= (0,41 \times RIF_{ANTRÓPICO}) + (0,29 \times RIF_{VEGETACIONAL}) \\ &+ (0,21 \times RIF_{CLIMÁTICO}) + (0,09 \times RIF_{TOPOGRÁFICO}) \end{aligned} \quad \text{Equação 8}$$

Em que: $RIF_{BIOMA CAATINGA}$ é o risco de incêndio florestal no Bioma Caatinga; $RIF_{ANTRÓPICO}$ é o risco de incêndio florestal com base em variáveis antrópicas; $RIF_{VEGETACIONAL}$ é o risco de incêndio florestal com base nas variáveis referentes à vegetação; $RIF_{CLIMÁTICO}$ é o risco de incêndio florestal com base nas variáveis climáticas; $RIF_{TOPOGRÁFICO}$ é o risco de incêndio florestal com base nas variáveis topográficas.

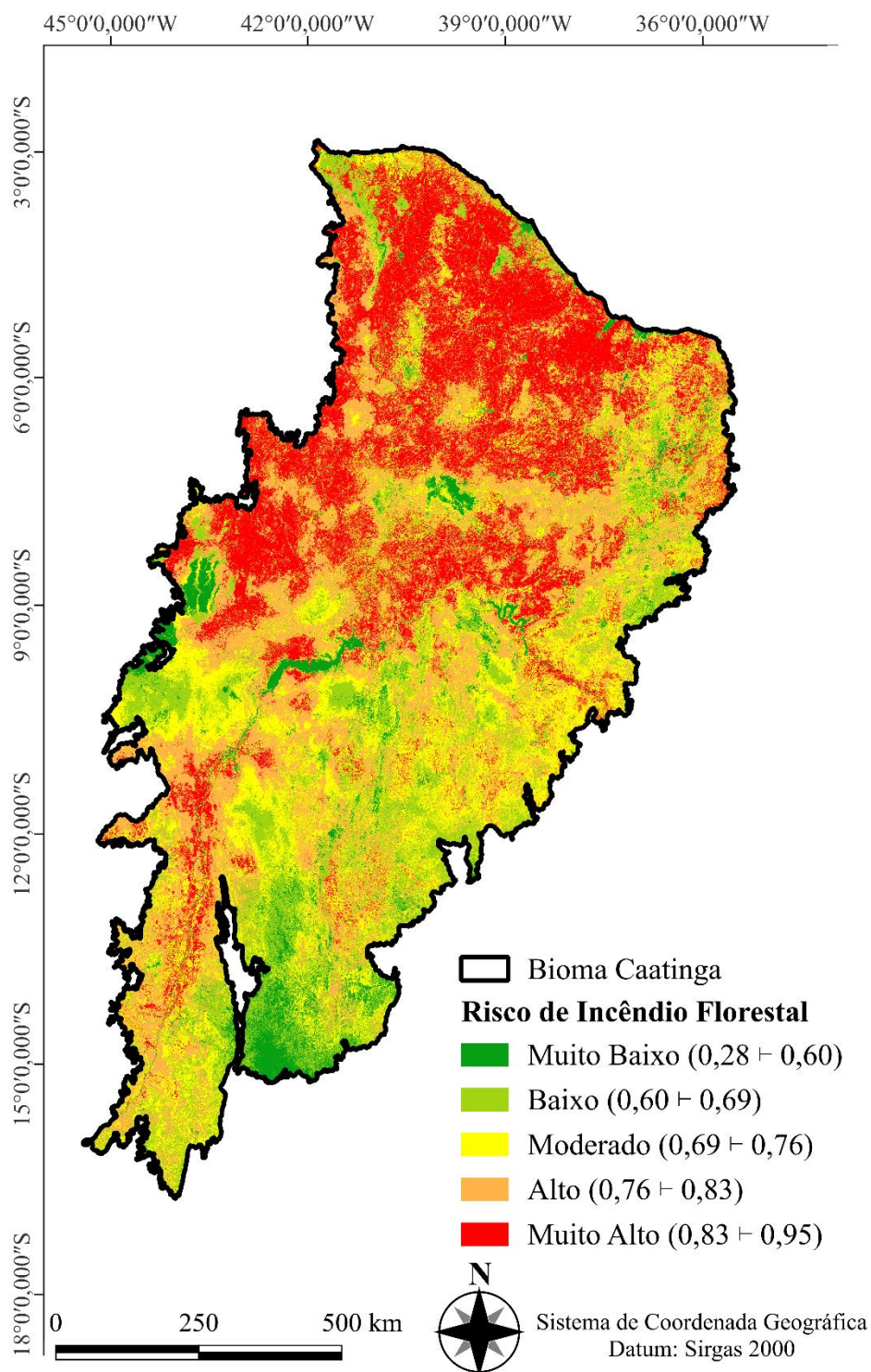
Figura 6 – Risco de incêndio conforme os grupos de variáveis do Bioma Caatinga



Fonte: a autora.

A Caatinga apresentou valores *fuzzy* entre 0,28 e 0,95, distribuídos em cinco classes de risco (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto), conforme representado na Figura 7.

Figura 7 – Risco de incêndio florestal do Bioma Caatinga

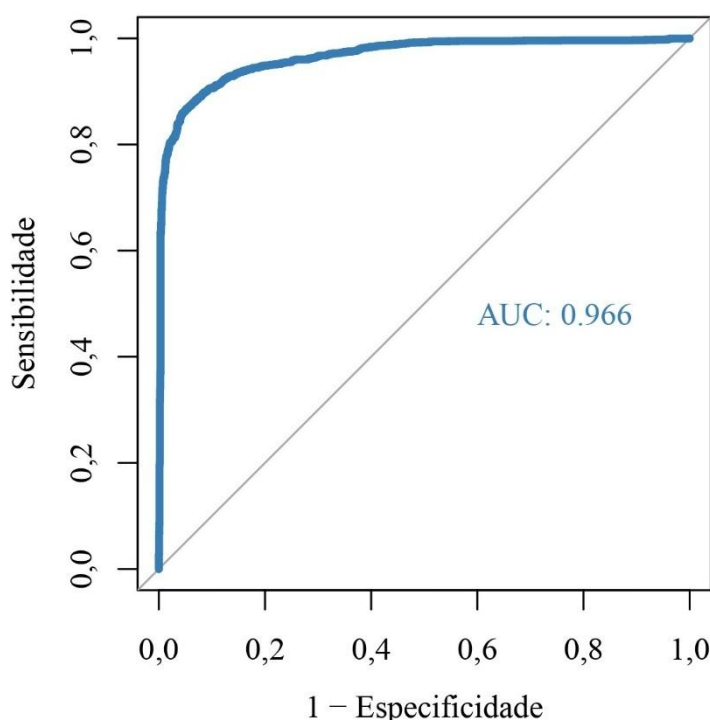


Fonte: a autora.

Observa-se que a reclassificação de Jenks, agrupou o maior intervalo *fuzzy* (0,28 - 0,60) na classe de muito baixo risco de incêndio florestal, sendo as demais definidas em intervalos semelhantes. As classes alto e muito alto representaram 53,75 % do território do Bioma, localizadas majoritariamente nas porções norte e oeste com destaque para os limites com o Bioma Cerrado. As classes muito baixo e baixo somam 22,01 % da extensão da Caatinga, enquanto a classe moderada representou 24,24 %. Dessa forma, estes resultados possibilitam inferir que o Bioma Caatinga se encontra sob risco alto de incêndio de acordo a modelagem *Fuzzy* – AHP.

A validação do modelo *Fuzzy*-AHP, de acordo com o método AUC-ROC, proporcionou uma precisão de 96,6 %, indicando uma assertividade do modelo em relação aos dados observados de incêndios na Caatinga (Figura 8). Este resultado, evidencia a eficácia da metodologia empregada, bem como dos pesos atribuídos aos parâmetros adotados para gerar o modelo de risco.

Figura 8 – Curva AUC-ROC referente ao modelo de risco de incêndios *Fuzzy*-AHP para o Bioma Caatinga



Fonte: a autora.

Para a validação de acordo com a densidade de pontos em cada classe proposta, foi realizada sobreposição das camadas de risco (estimado) com a ocorrência de

incêndio no ano de 2021 (observado). Assim, foi possível identificar que 77,63 % dos pontos de fogo encontram-se nas classes estimadas como de risco alto e muito alto risco para o Bioma. Nestas classes também se encontram as maiores concentrações de incêndio por área, corroborando com a assertividade em modelar o risco de incêndio para o Bioma (Tabela 6). Ademais, é importante salientar que o modelo de risco indica maior área da Caatinga como sendo de risco alto aos incêndios florestais, no entanto, quando se observa a densidade de pontos para as classes, a de risco muito alto configura como a de maior densidade, onde em cada km², observa-se a ocorrência de 1,58 incêndios, enquanto a classe alto representa 1,05.

Tabela 6 – Relação entre as ocorrências observadas de incêndios e o risco estimado pela modelagem *Fuzzy* – AHP na Caatinga

Classe de Risco	Estimado		Observado		Densidade
	Área (km ²)	Área (%)	Nº de pontos de fogo	% pontos/classe	
Muito Baixo (0,28 - 0,60)	49.680,77	5,76	7.578	0,98	0,15
Baixo (0,60 - 0,69)	140.044,02	16,25	57.354	7,42	0,41
Moderado (0,69 - 0,76)	208.969,97	24,24	107.890	13,96	0,52
Alto (0,76 - 0,83)	249.218,16	28,91	261.610	33,86	1,05
Muito Alto (0,83 - 0,95)	214.076,47	24,84	338.287	43,78	1,58

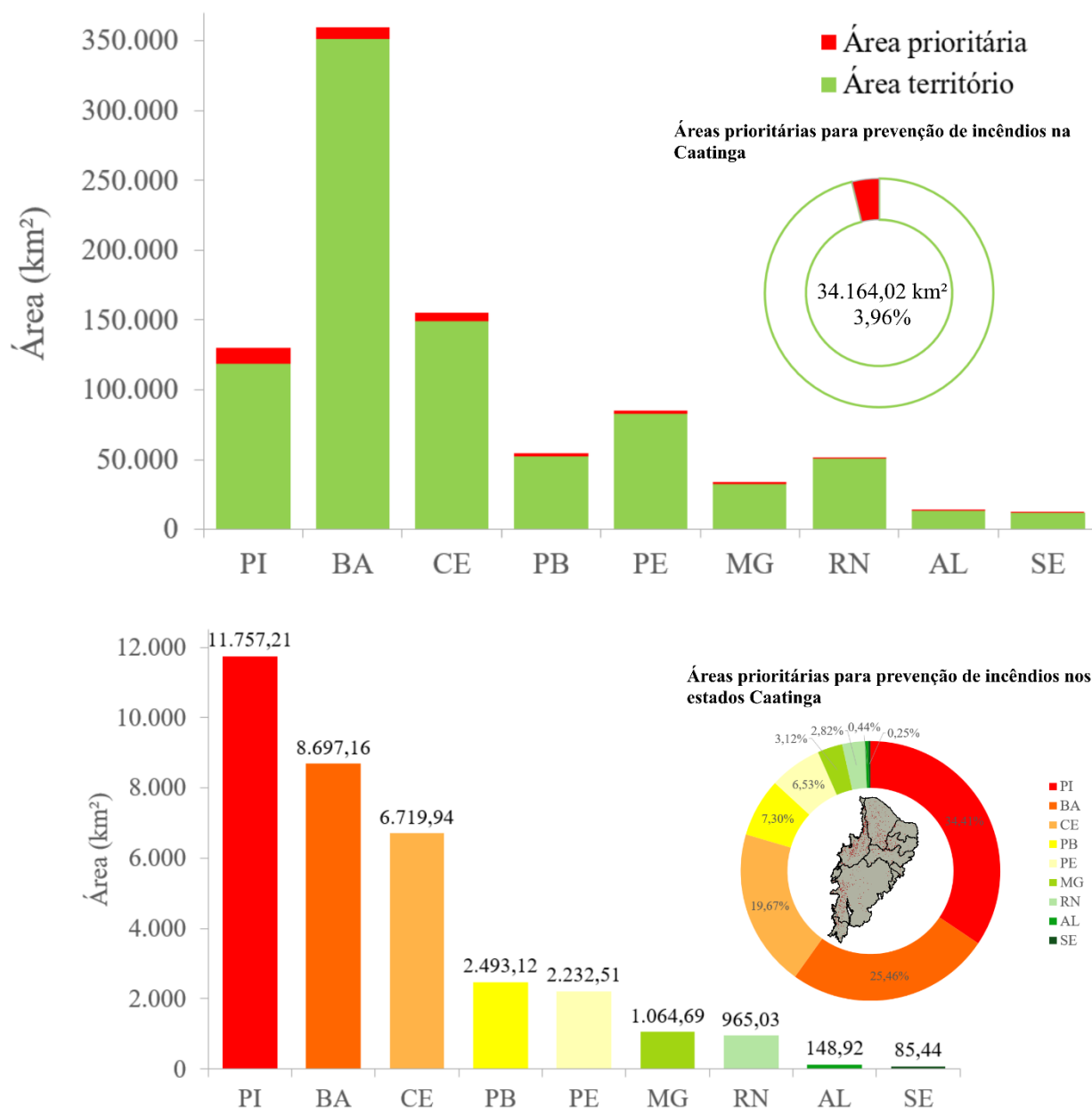
Fonte: a autora.

3.2 Delimitação de áreas prioritárias para prevenção de incêndios

Foram identificados 34.167,73 km² em áreas prioritárias para a prevenção dos incêndios florestais na Caatinga, o que corresponde a 3,96 % do território, distribuídas de maneira bastante fragmentada no território do Bioma. Esta distribuição encontra-se mais representativa nos estados do Piauí (11.757,21 km²), Bahia (8.697,16 km²) e Ceará (6.719,94 km²), que englobam 79,54 % do total (Figura 9).

Os demais estados (Paraíba, Pernambuco, Minas Gerais, Rio Grande do Norte, Alagoas e Sergipe) somaram 6.989,71 km² de áreas prioritárias, sendo os estados de Alagoas e Sergipe com menores percentuais dentre àqueles pertencentes ao Bioma Caatinga.

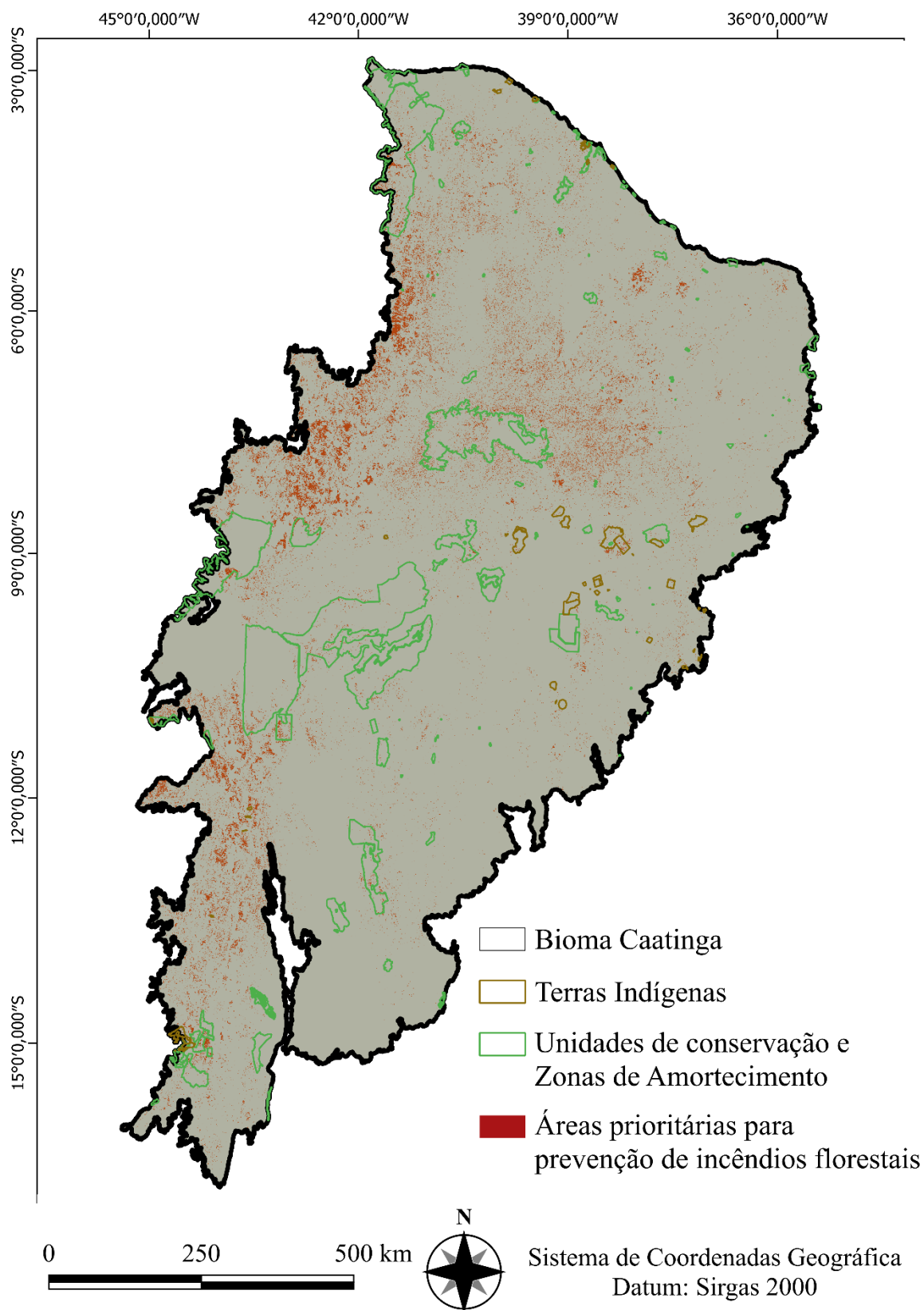
Figura 9 – Áreas prioritárias para implantação de políticas de prevenção aos incêndios florestais na Caatinga



Fonte: a autora.

Para o refino deste resultado, foram filtradas as regiões prioritárias encontradas sob domínio de áreas protegidas (unidades de conservação e territórios indígenas), as quais são consideradas de importante relevância para a conservação da biodiversidade (Figura 10). De modo geral, as áreas prioritárias para prevenção de incêndios florestais na Caatinga encontram-se fora das áreas protegidas (92,02 %), indicando uma predominância para prevenção em territórios de propriedades rurais particulares.

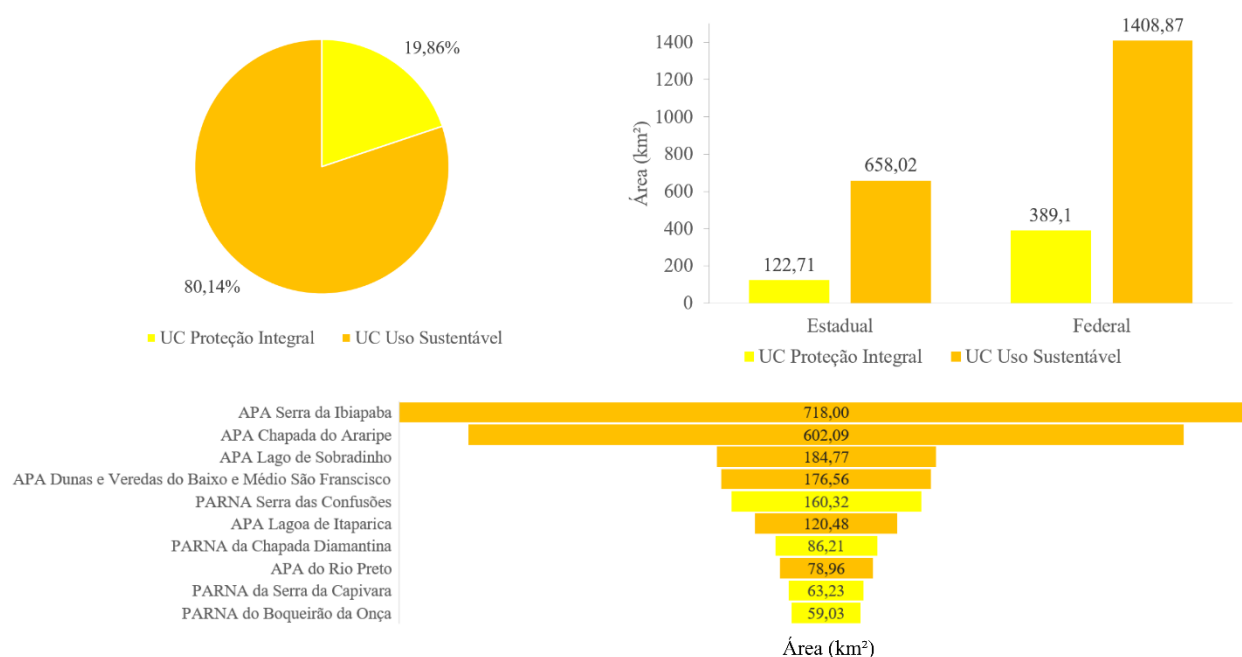
Figura 10 – Áreas prioritárias para prevenção de incêndios florestais no Bioma Caatinga, indicando as áreas protegidas: Unidades de Conservação (verde) e Territórios Indígenas (marrom)



Fonte: a autora.

A Caatinga apresenta 156 unidades de conservação sob as esferas federal e estadual, em que 108 UC apresentaram algum fragmento com características de necessidade à prevenção dos incêndios florestais, totalizando 2.579,05 km². Destas, 80,14 % representam UC do grupo uso sustentável, enquanto 19,86 % representam UC do grupo proteção integral, regidas em grande maioria sob a esfera federal (Figura 11).

Figura 11 – Áreas prioritárias para prevenção de incêndios florestais nas unidades de conservação do Bioma Caatinga



Fonte: a autora.

Dentre as dez unidades com maior destaque para a prevenção dos incêndios em valores absolutos, 60 % são do grupo uso sustentável, categoria Área de Proteção Ambiental (APA), enquanto 40 % são do grupo proteção integral e categoria Parque Nacional (PARNA). As UC de maior representatividade em áreas prioritárias são a APA Serra da Ibiapaba (718 km²), localizada entre os estados do Piauí e Ceará, e a APA Chapada do Araripe (602,09 km²), entre os estados do Piauí, Ceará e Pernambuco, os quais totalizam 51,18 % das áreas prioritárias nas UC. Nesta mesma categoria, no entanto com menor representatividade, seguem a APA Lago de Sobradinho, APA Dunas e Veredas do Baixo e Médio São Francisco, APA Lagoa de Itaparica e APA Rio Preto, todas localizadas no estado da Bahia.

Na categoria PARNA, o Parque Nacional Serra das Confusões (160,32 km²), localizado no Piauí, e o Parque Nacional da Chapada Diamantina (86,21 km²) na Bahia,

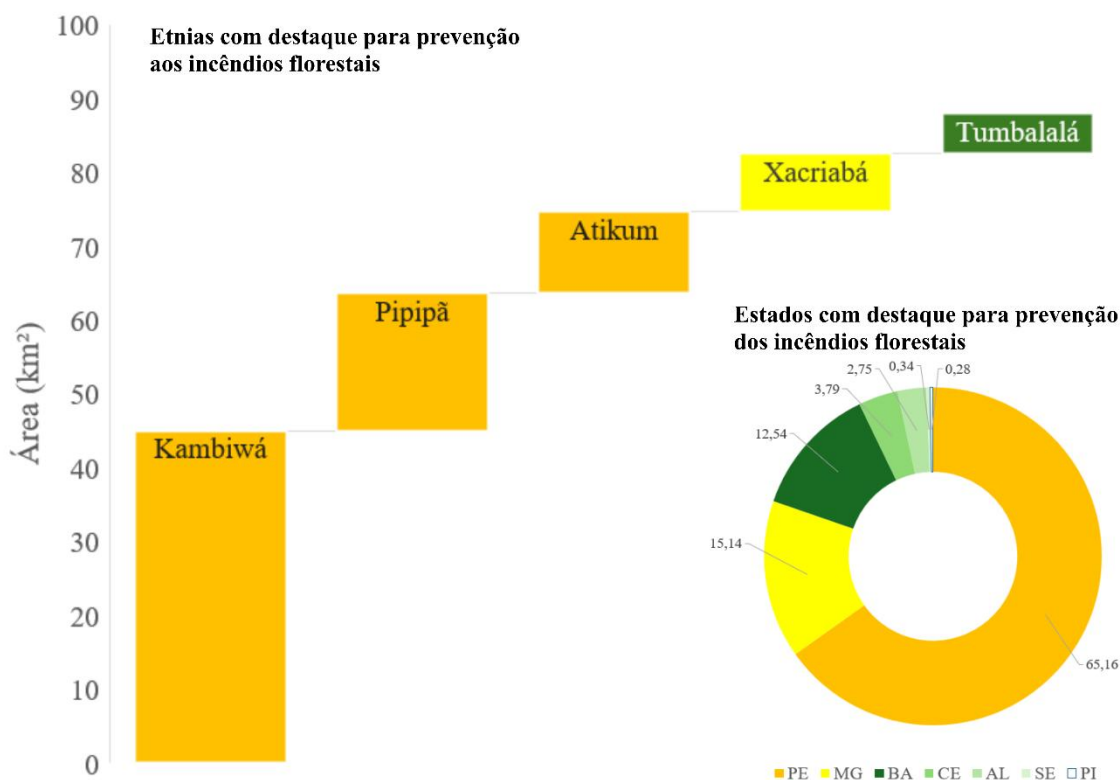
destacaram-se entre os demais. Em seguida, encontram-se o PARNA da Serra da Capivara e PARNA do Boqueirão da Onça, localizados no Piauí e na Bahia, respectivamente.

Em complemento, apesar de representarem menores valores absolutos em áreas prioritárias, observou-se que unidades de conservação de menor extensão apresentaram percentuais representativos de áreas prioritárias para prevenção aos incêndios florestais, quando considerados a totalidade do território. Para estes casos, destacaram-se a Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Recanto dos Pássaros, localizada no estado da Bahia, com 22,14 % do território sob atenção para prevenção e a APA Lajedão, em Minas Gerais, com 20,25 % do território de áreas prioritárias.

Sobre os TI, a Caatinga apresenta 40 territórios indígenas com 26 etnias distintas, localizadas predominantemente no estado de Pernambuco. Os resultados indicaram número reduzido de áreas prioritárias, quando comparado aos demais, com apenas 123,34 km², distribuídos majoritariamente nos estados de Pernambuco (65,16 %), Minas Gerais (15,14 %) e Bahia (12,54 %). Em contrapartida, observou-se que os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte não englobam TI nos territórios do Bioma Caatinga. Deste modo, não apresentaram prioridade de acordo com essa categoria.

Dentre os povos indígenas, as áreas de prioridade foram destacadas para a TI Kambiwá (45,05 km²), TI Pipipã (18,65 km²) e TI Atikum (11,09 km²) em Pernambuco; TI Xacriabá (7,80 km²) em Minas Gerais e a TI Tumbalalá (5,48 km²) na Bahia (Figura 12), somando 87,98 km². As demais TI apresentaram áreas prioritárias inferiores a 5,00 km², das quais somadas representam 33,11 % das áreas prioritárias para prevenção de incêndios em TI.

Figura 12 – Áreas prioritárias para prevenção de incêndios florestais nas terras indígenas do Bioma Caatinga



Fonte: a autora.

4. DISCUSSÃO

4.1 Risco de incêndios florestais com Lógica Fuzzy

A metodologia *Fuzzy-AHP*, empregada neste estudo demonstrou eficiência para o zoneamento de risco dos incêndios florestais na Caatinga, proporcionando uma uniformidade na delimitação das classes de risco, bem como uma alta precisão na determinação das áreas queimadas. Assim, considerando que a validação é um importante fator para pesquisas que envolvem modelagem (Paz *et al.*, 2011), o presente estudo apresenta comprovação da eficácia do modelo, configurando importante ferramenta para a gestão dos incêndios florestais na região do semiárido brasileiro.

O zoneamento de risco proposto considerou o grupo de variáveis topográficas como a de menor relevância para a Caatinga, principalmente, devido a homogeneidade observada para a declividade, caracterizado como terreno plano a suavemente ondulado, contrariando o que se configura um terreno de fácil propagação para o fogo (Kayet *et al.*, 2020). A não utilização da variável orientação do relevo, deu-se pela

localização do Bioma quanto a latitude, onde quanto mais próxima a linha do Equador, menor a influência da orientação do relevo na incidência de raios solares (França *et al.*, 2018; Funari; Tarifa, 2017). Em contrapartida, por tratar-se de ambiente com característica de vegetação esparsa, independente da passagem do fogo e sem ocorrência natural do mesmo (Pivello *et al.*, 2021), os grupos das variáveis relacionadas à vegetação e ao fator antrópico foram considerados os mais importantes para a delimitação do risco de incêndio florestal no Bioma. Esses fatores correspondem a dois elementos do triângulo do fogo: combustível e ignição, respectivamente. A combinação desses dois fatores eleva substancialmente o risco de incêndios florestais (Santana; Delgado; Schiavetti, 2021).

O grupo das variáveis climáticas, apesar de ter grande relevância para caracterização do Bioma (Giulietti *et al.*, 2004), foi considerado um fator intermediário para o zoneamento de risco. Isso se deve a um paradoxo: embora a Caatinga apresente altas temperaturas e um índice de seca que favorecem a secagem do material combustível, aumentando a probabilidade de incêndios (Sousa, 2023), as áreas do Bioma com essas características também registram os maiores índices de pluviosidade anual, o que, naturalmente, reduziria o risco de fogo. Esta região do Brasil é caracterizada pela sazonalidade na ocorrência de chuvas, cuja distribuição irregular no tempo e no espaço resulta em precipitações intensas e de curta duração (Silva *et al.*, 2020). Esse padrão climático favorece o crescimento do material combustível durante a estação chuvosa e sua rápida secagem na estação seca, tornando-o suscetível à propagação do fogo.

Desta maneira, as áreas classificadas como de muito alto risco de incêndios florestais na Caatinga apresentam, majoritariamente, baixa altitude, vegetação savânica mais densa, temperaturas elevadas e intensa atividade antropogênica. Estas regiões estão localizadas, principalmente, ao norte e oeste do Bioma, concentradas principalmente na divisa com o Bioma Cerrado, sendo o estado do Piauí o de maior atenção e risco. Estes resultados corroboram com o observado por Silva, Juvanhol e Miranda (2023), que identificaram o estado como o de maior vulnerabilidade à passagem do fogo na Caatinga entre os anos de 2001 e 2018. Além disso, as áreas classificadas como de alto risco encontram-se distribuídas de forma fragmentada ao longo do Bioma, refletindo o padrão dos incêndios florestais. Destacam-se regiões de maior altitude, como a Chapada Diamantina, na Bahia, e áreas com vegetação antropizada no leste do Bioma, ambas consideradas suscetíveis à ocorrência do fogo.

As pastagens e savanas apresentam maiores taxas de propagação do fogo, com vegetação mais inflamável devido à presença de Biomassa fina, o que ocasionam maiores taxas de combustão e, conseqüentemente, emitem mais calor e carbono, quando comparadas às formações florestais (Gomes *et al.*, 2020; Holfman *et al.*, 2012). No presente estudo, observou-se que as formações florestais foram classificadas pelo modelo como zonas de baixo a muito baixo risco de incêndios florestais, possivelmente devido ao vigor atribuído a esta vegetação (alto NDVI) e, conseqüentemente, à maior umidade, que não favorece a propagação do fogo (Silva, 2023).

De modo geral, a presente pesquisa permitiu delimitar que a Caatinga pode ser considerada uma região de alto risco para incêndios florestais, devido às características ambientais intrínsecas ao Bioma, com clima seco e fitofisionomias que não são capazes de proporcionar um ambiente ameno que evite a ocorrência dos incêndios. Esses resultados corroboram com os descritos por Aparecido *et al.* (2024), que indicam áreas da Caatinga como de maiores riscos a incidência e propagação do fogo no Brasil.

4.2 Áreas prioritárias para prevenção de incêndios

A fragmentação da ocorrência dos incêndios florestais observada na Caatinga, ao longo dos anos, proporcionou uma delimitação de áreas prioritárias igualmente fragmentadas. Essas porções estão localizadas majoritariamente nos estados onde os eventos de incêndios em vegetação nativa são recorrentes ao longo dos anos, Piauí, Bahia e Ceará (MapBiomas, 2025). Esses estados, são considerados por outros estudos como de alta vulnerabilidade aos incêndios florestais (Silva; Juvanol; Miranda, 2023), inclusive quando se trata de áreas protegidas (Torres *et al.*, 2016), o que corrobora com o indicado por esta pesquisa, onde as maiores porções de áreas prioritárias dentro de UC encontram-se sob domínio do estado do Piauí.

De um modo geral, as áreas delimitadas como prioritárias para prevenção aos incêndios encontram-se predominantemente próximas à divisa do Bioma Caatinga com o Cerrado, onde a vegetação nativa apresenta características de transição, acarretando comportamento do fogo inerente às duas regiões. Ou seja, neste ecótono os incêndios que atingem grandes extensões ocorrem em intervalos de um ou dois anos, característica da vegetação do Cerrado que depende do fogo para manutenção do ecossistema, enquanto a produção de Biomassa entre incêndios é favorecida nas épocas de chuva, acumulando material combustível para serem queimados nas épocas de seca severa, intrínseco à Caatinga (Argibay *et al.*, 2020; Aparecido *et al.*, 2024).

Essas características da vegetação são também atribuídas às unidades de conservação que se destacaram quanto à necessidade em prevenção aos incêndios, como são os casos da APA Serra da Ibiapaba (Sousa; Ivanov, 2022), do PARNA Serra das Confusões (Argibay *et al.*, 2020) e do PARNA Chapada Diamantina (Funch; Harley; Funch, 2009), onde os eventos de fogo são frequentes e políticas de prevenção e manejo devem ser adotadas para garantirem a manutenção da biodiversidade local.

As áreas prioritárias para prevenção de incêndios encontram-se majoritariamente localizados fora de áreas protegidas pelo Estado, ou seja, em propriedades particulares, onde o uso do fogo antrópico como forma de manejo das áreas de agricultura e pastagem, estão diretamente associados aos eventos de incêndios florestais (Atongiovanni; Venticinque; Fonseca, 2018). Neste sentido, destaca-se a importância e eficácia de programas de capacitação e incentivo ao uso consciente do Manejo Integrado do Fogo (MIF), capazes de prevenir a ocorrência de grandes incêndios florestais (Oliveira *et al.*, 2021).

Por muitos anos, a Caatinga foi negligenciada por ser considerada menos diversa e rica em comparação com outros Biomas brasileiros (Moro *et al.*, 2015). Essa percepção resultou em políticas de conservação que destinaram apenas uma pequena parte do território a reservas naturais protegidas (Moro *et al.*, 2016), o que pode explicar o baixo percentual de áreas prioritárias inseridas em UC na Caatinga. Além disso, a reduzida extensão das áreas delimitadas como TI no Bioma, localizadas no lado oposto ao de maior ocorrência de incêndios, pode ter contribuído para que nesses territórios não tenham sido indicadas grandes extensões de áreas prioritárias. Entretanto, são nessas pequenas porções do Bioma que estão concentradas a maior conservação de biodiversidade local, onde deveriam ser intensificadas as medidas de prevenção ao fogo.

Estudos relacionados ao manejo florestal em área de Caatinga no estado do Piauí indicam que o fogo é um agente modificador da paisagem no Bioma, que mesmo com grande resiliência, sofreu perda de diversidade florística, espécies arbóreas e taxa de crescimento após episódio de incêndio, além de redução de viabilidade e diversidade das sementes de espécies arbóreas no banco de solos da floresta (Ribeiro; Ferraz Filho; Costa Filho, 2024). Desta forma, é possível inferir que a recorrência de incêndios florestais em ambiente considerado independente do fogo, são altamente prejudiciais à formação florestal e ao potencial de regeneração natural, transformando em um Bioma sensível ao fogo (Pivello *et al.*, 2021).

Os recorrentes episódios de incêndios neste Bioma (Jesus *et al.*, 2019; Leite *et al.*, 2017; Vieira, 2021), associados ao uso e manejo inadequado da vegetação e do fogo, contribuem para o aumento dos índices de degradação da Caatinga. Essa região semiárida brasileira corresponde a extensão territorial do país mais sujeita a degradação e secas, onde se encontram grande parte das Áreas Susceptíveis à Desertificação (ASD) (Brasil, 2021), o que a caracteriza como de alta sensibilidade aos eventos de mudança climática (Koutroulis, 2019) e, conseqüentemente, como uma das regiões mais ameaçadas do planeta (Moro *et al.*, 2016). Assim, a delimitação de áreas prioritárias para prevenção aos incêndios florestais torna-se instrumento fundamental na gestão dos recursos públicos, indicando áreas onde a ocorrência do fogo deve ser evitada ou reduzida, para que conseqüentemente haja contribuição para manutenção do ecossistema local.

Neste sentido, novas iniciativas públicas apresentam propostas que visam promover a conservação do Bioma. Recentemente o Ministério do Meio Ambiente e Mudança Climática (MMA), apoiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), lançaram os projetos “Conecta Caatinga” e “Áreas Protegidas da Caatinga (Arca)” que visam, respectivamente, a criação de corredores ecológicos entre as UC no Bioma, bem como a criação de novas áreas protegidas. Esses projetos estão atrelados a Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca, Lei Federal nº 13.153/2015 (Brasil, 2015), proporcionando a integração de áreas protegidas, propriedades privadas e territórios tradicionais, na Caatinga.

Atrelado a estes projetos, é fundamental o cumprimento das políticas de prevenção aos incêndios previstos no Código Florestal, Lei Federal nº 12.651/2012 (Brasil, 2012), juntamente com a aplicação dos objetivos da Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo, Lei Federal nº 14.944/2024 (Brasil, 2024). Isso garantirá a redução dos danos causados pelos incêndios às vegetações nativas, além de favorecer a busca e reconhecimento do papel ecológico do fogo, dos saberes tradicionais e do MIF. Ademais, estudos relativos à implementação do MIF e criação de brigadas especializadas consideram as técnicas de perfeita sinergia para a prevenção e combate aos incêndios florestais. Enquanto o MIF resgata os conhecimentos tradicionais e a validação do uso do fogo por meio de técnicas ancestrais, as brigadas fornecem capacitação para a proteção ambiental (Falleiro; Santana; Bernin, 2016).

Assim, este estudo fornece resultados no âmbito espacial capazes de nortear os tomadores de decisões para gestão e prevenção dos incêndios florestais, com ênfase

na manutenção e conservação da biodiversidade de um Bioma exclusivamente brasileiro. De acordo com Oliveira *et al.* (2021), o investimento em técnicas de prevenção aos incêndios reduz em até 50 % as áreas queimadas, além de serem inferiores aos custos de combate e remediação dos danos causados pelo fogo. No entanto, estudos adicionais devem ser realizados para a indicação das melhores estratégias a serem adotadas para prevenção, de acordo com as diversas fitofisionomias da Caatinga.

5. CONCLUSÕES

A ferramenta *Fuzzy-AHP*, bem como as variáveis topográficas, climáticas, vegetacionais e antrópicas propostas, demonstraram eficiência para a modelagem do zoneamento de risco de incêndios florestais na Caatinga, classificando este Bioma como de alto a muito alto risco à ocorrência do fogo.

Associado ao risco, os estados do Piauí, Bahia e Ceará foram identificados como os que apresentam maior necessidade de prevenção a incêndios, sendo as unidades de conservação de uso sustentável as áreas protegidas com maior destaque para a prevenção. Em complemento, o ecótono Caatinga-Cerrado se destacou pelas características da vegetação, indicando a necessidade de prioridade na prevenção.

Quanto as áreas privadas, o uso do fogo como forma de manejo pode ocasionar incêndios em formações florestais nativas. Por isso, medidas de fiscalização e capacitação aos produtores rurais devem ser implementadas para evitar que os incêndios florestais ocasionem perdas nos ecossistemas.

Estes resultados poderão auxiliar na gestão territorial do Bioma, direcionando esforços aos estados mais atingidos e com risco de eventos do fogo, unidades de conservação que necessitam de brigadas permanentes, regiões onde a fiscalização ambiental devem ser mais efetivas e inserção de técnicas de manejo integrado do fogo as áreas protegidas de maior evidência, permitindo assim que a prevenção aos incêndios se torne ferramenta para auxiliar na manutenção e conservação da biodiversidade da Caatinga.

6. REFERÊNCIAS

ADAB, H.; DEVI, K.; KARIM, K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. **Nat Hazards**, v. 65, p. 1723–1743, 2013.

ABATZOGLOU, J. T. *et al.* TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. **Scientific Data**, v. 5, p. 1–12,

2018.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANA, **Conjuntos de Dados**. Disponível em: < <https://dadosabertos.ana.gov.br/>>. Acesso em: 16 de jun. de 2023.

ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; FONSECA, C. R. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 8, p. 1353–1367, 2018.

APARECIDO, L. E. O. *et al.* Assessing fire risk and safeguarding Brazil's biomes: a Multifactorial Approach. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 155, p. 8815–8824, 2024.

AQUINO, D. N. *et al.* Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. **Agricultural Engineering**. v. 49, n. 3, 2018.

ARGIBAY, D. S.; SPARACINO, J. ESPINDOLA, G. M. A long-term assessment of fire regimes in a Brazilian ecotone between seasonally dry tropical forests and savannah. **Ecological indicators**, v. 113, 106151, 2020.

BRASIL, 2021. **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: < <https://www.gov.br/jbrj/pt-br/assuntos/noticias/a-flora-do-brasil-2020-lanca-seus-dados>. Acesso em: 14 de jan. de 2025.

_____. **Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

_____. **Lei Federal nº 14.944, de 31 de julho de 2024**. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo e altera as Leis nºs 7.735, de 22 de fevereiro de 1989, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), e 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (Lei dos Crimes Ambientais). Diário Oficial da União, Brasília, DF.

_____. **Lei Federal nº 13.153, de 30 de julho de 2015**. Institui a Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca e seus instrumentos; prevê a criação da Comissão Nacional de Combate à Desertificação; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BHADORIA, R. S.; PANDEY, M. K.; KUNDU, P. RVFR: Random vector forest regression model for integrated & enhanced approach in forest fires predictions. **Ecological Informatics**, v. 66, p. 101471, 2021.

BUCKEY, J. J.; FEURING, T.; HAYASHI, Y. *Fuzzy hierarchical analysis revisited*. **European Journal of Operational Research**. v. 129, p. 48-64, 2001.

CASTELLETTI, C. H. M. *et al.* Quanto ainda resta na Caatinga? Uma estimativa preliminar. In: SILVA, J. M. C. *et al* (Orgs.). **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004. p. 91-100.

CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. **Remote Sens. Environ**, v. 159, n. 29, p. 147–159, 1989.

COSTA, G. A. *et al.* Geotechnologies applied to the behavioral study of urban heat islands. **Mercator**, Fortaleza, v. 22, 2023

EUGENIO, F. C. **Análise de risco de incêndios em florestas plantadas**. 2017. 163 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

FALLEIRO, R. M.; SANTANA, M. T.; BERNIN, C. R. As Contribuições do Manejo Integrado do Fogo para o Controle dos Incêndios Florestais nas Terras Indígenas do Brasil. **Biodiversidade Brasileira**. v. 6, n. 2, p. 88-105, 2016

FERNANDES, L. C. **Modelagem de risco de incêndios florestais utilizando redes neurais artificiais aplicada às regiões metropolitanas**. 2019. 948 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais - Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

FRANÇA, M. M. *et al.* Topographic shadow influence on optical image acquired by satellite in the southern hemisphere. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 5, p. 728 – 740, 2018.

FUNARI, F. L.; TARIFA, J. R. Sunshine, global radiation and net radiation in Brazil. **Revista do Instituto Geológico**, v. 38, n. 2, p. 49 – 83, 2017.

FUNCH, R. R.; HARLEY, R. M.; FUNCH, L. S. Mapping and evaluation of the state of conservation of the vegetation in and surrounding the Chapada Diamantina National Park, NE Brazil. **Biota Neotrop.**, v. 9, n. 2, 2009.

GAME, E. T.; KAREIVA, P.; POSSINGHAM, H. P. Six Common Mistakes in Conservation Priority Setting. **Conservation Practice and Policy**, v. 27, n. 3, 2013.

GARCIA, L. C. *et al.* Record-breaking wildfires in the world's largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. **Journal of Environmental Management**, v. 293, 2021.

GIULIETTI, A. M. *et al.* Diagnóstico da Floresta Nativa do Bioma Caatinga. In: SILVA, J. M. C. (Org.). **Biodiversidade da Caatinga áreas e ações prioritárias para a Conserv.** Recife: Ministerio do Meio Ambiente, 2004. p. 48–90.

GOMES, L *et al.* Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. August 2019, 2020.

HOLFFMAN, W. A. *et al.* Fuels or microclimate? Understanding the drivers of fire

feedbacks at savanna–forest boundaries. **Austral Ecology**, v. 37, p. 634-643, 2012.

INPE, 2024. **Programa Queimadas**. Disponível em: <<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/aq1km/>>. Acesso em: 13 de jan. de 2024.

INPE, 2022. **Banco de dados geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 12 de nov. de 2022.

KAYET, N. *et al.* Comparative analysis of multi-criteria probabilistic FR and AHP models for forest fire risk (FFR) mapping in Melghat Tiger Reserve (MTR) forest. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 2, p. 565–579, 2020.

JESUS, J. B. *et al.* Análise da incidência temporal, espacial e de tendência de fogo nos Biomas e unidades de conservação do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 176–191, 2019.

JUVANHOL, R. S. **Aprendizado de máquina na modelagem de incêndios florestais no estado do Espírito Santo**. 2017. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

LEITE, C. C. S. de S. *et al.* Análise dos incêndios ocorridos no Parque Nacional da Chapada Diamantina - Bahia em 2008 e 2015 com suporte em índices espectrais de vegetação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p. 1127-1141, 2017.

MAPBIOMAS. **Histórico do fogo no Brasil: 1985-2024**. Disponível em: <<https://plataforma.brasil.mapBiomas.org/hotsite-fogo>>. Acesso em: 14 de jan. de 2025.

MARTINS, P. I. *et al.* Prioritising areas for wildfire prevention and post-fire restoration in the Brazilian Pantanal. **Ecological Engineering**. v. 176, 2022.

MORO, M. F. *et al.* A phytogeographical metaanalysis of the semiarid caatinga domain in Brazil. **Botanical Review**, v. 82, n. 2, p. 91-148, 2016.

MORO, M.F. *et al.* Síntese dos estudos florísticos e fitossociológicos realizados no semiárido brasileiro. In: EISENLOHR, P.V.; *et al.* (eds.). **Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de caso**. Volume II. Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2015, p 412–451.

OLIVEIRA, A. S. *et al.* Costs and effectiveness of public and private fire management programs in the Brazilian Amazon and Cerrado. **Forest Policy and Economics**. v. 127, 2021.

PAZ, S. *et al.* Post-fire analysis of pre-fire mapping of fire-risk: A recent case study from Mt. Carmel (Israel). **Forest Ecology and Management**. v. 262, p.1184-1188, 2011.

PIVELLO, V. R. *et al.* Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**. v. 19, 233–255, 2021.

PRAGYA, M. K. *et al.* Integrated Spatial Analysis of Forest Fire Susceptibility in the Indian Western Himalayas (IWH) Using Remote Sensing andGIS-Based *Fuzzy* AHP Approach. **Remote Sensing**. v. 15, 2023.

RAMALHO, A. H. C. *et al.* Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113-122, 2021.

RAMALHO, A. H. C. **Modelagem geotecnológica de predição, prevenção, detecção e combate a incêndios florestais**. 2022. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2022.

RIBEIRO, A; FERRAZ FILHO, A. C.; COSTA FILHO, R. T. A dinâmica da vegetação de Caatinga na unidade experimental São João do Piauí. In: BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Manejo florestal da Caatinga – 40 anos de experimentação**. Brasília, 2024, p. 257-280.

SANT'ANNA, C. M.; FIEDLER, N. C.; RAMALHO, A. H. C. Métodos de propagação dos incêndios florestais e fatores influentes. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. M.; RAMALHO, A. H. C. (Org.). **Incêndios Florestais**. Jerônimo Monteiro, ES: UFES, 2020. p. 242.

SANTANA, R. O.; DELGADO, R. C.; SCHIAVETTI, A. Modeling susceptibility to forest fires in the Central Corridor of the Atlantic Forest using the frequency ratio method. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113–343, 2021.

SCHMIDT, I. B. *et al.* Experiências internacionais de manejo integrado do fogo em áreas protegidas – recomendações para implementação de manejo integrado de fogo no Cerrado. **Biodiversidade Brasileira**, v. 6, p. 41-54, 2016.

SCHUMACHER, M. V.; DICK, G. **Incêndios Florestais**. 3. ed. rev ed. Santa Maria: UFSM, CCR, Departamento de Ciências Florestais, 2018.

SILVA, A. C.; JUVANHOL, R. S.; MIRANDA, J. R. Variabilidade espaço-temporal de ocorrência e recorrência de fogo no Bioma Caatinga usando dados do sensor MODIS. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 1-23, 2023.

SILVA, J. L. B. *et al.* Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, 2020.

SILVA, J. P. M. **Modelagem de riscos de incêndios florestais e otimização da alocação das estruturas de combate por meio de técnicas de inteligência artificial**. 2023. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2023.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F.. **Incêndios florestais: controle, efeito e uso do fogo**. 2ª edição ed. Curitiba: [s.n.], 2017.

SOUALAH, L.; BOUZEKRI, A.; CHENCHOUNI, H. Hoping the best, expecting the worst: Forecasting forest fire risk in Algeria using *fuzzy* logic and GIS. **Trees, Forests and People**. v. 17, 2024.

SOUSA, B. R. **Direcionadores dos incêndios florestais no Pantanal: análise temporal e associação com Biomas adjacentes**. 2023. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, 2023.

SOUSA, T. P. V.; IVANOV, M. M. M. Ptatus das unidades de conservação do estado do Piauí. In: IVANOV, M. M. M.; LEMOS, J. R. **Unidades de conservação do Estado do Piauí**, Volume 2, Teresina, 2022, p. 9-32.

TORRES, F. T. P. *et al.* Mapeamento da suscetibilidade a ocorrência de incêndios em vegetação ne área urbana de Ubá - MG. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 811-817, 2014.

VIEIRA, G. dos S. **Análise espaço-temporal do fogo no Bioma Caatinga**. 2021. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, 2021.

YANG, X.; JIN, X.; ZHOU, Y. Wildfire risk assessment and zoning by integrating maxent and GIS in Hunan Province, China. **Forests**, v. 12, n. 10, 2021.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. **Information and Control**. v. 8, p. 338-353, 1965.

CONCLUSÕES GERAIS

Esta pesquisa aborda uma visão sobre os incêndios florestais na perspectiva de um Bioma considerado independente do fogo para manutenção do ecossistema. Apesar de menos frequente e em pequenas escalas, a passagem do fogo pela Caatinga corresponde a um fator significativo para a degradação da biodiversidade local, o que reforça a necessidade em delimitar áreas de risco e prioritárias para a prevenção dos incêndios florestais.

As características da Caatinga quanto as variáveis climáticas, vegetacionais e topográficas, somadas às variáveis antrópicas consideradas nesta pesquisa, proporcionam ambiente favorável a ocorrência e propagação dos incêndios florestais no Bioma, sendo fundamentais para prever regiões de risco. Os resultados do zoneamento de risco aos incêndios florestais por modelagem *fuzzy-AHP*, permitiu inferir de forma precisa que a Caatinga é considerada como de alto a muito alto risco e necessita de gestão pública que impeçam esses eventos, principalmente na transição Caatinga-Cerrado.

A partir do risco de incêndio e regiões onde há predominância de biodiversidade da Caatinga, este estudo permitiu identificar as áreas prioritárias para a prevenção aos incêndios florestais. Onde foi possível concluir que o estado do Piauí e as unidades de conservação de uso sustentável, são as mais urgentes quanto à prevenção e manejo do fogo. Neste sentido, técnicas e ferramentas de gestão e prevenção ao fogo devem ser estudadas, definidas e aplicadas nessas regiões prioritárias para auxiliar na preservação do Bioma Caatinga.